



Aalto-yliopisto

Sähkötekniikan korkeakoulu

Anton Kaisti

## Testausalusta bluetooth-kaiuttimelle

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 24.04.2019

Valvoja: Professori Pekka Eskelinen

Ohjaaja: DI Kim Kaisti

AALTO-YLIOPISTO TEKNIKAN KORKEAKOULUT PL 12100, 00076 Aalto <a href="http://www.aalto.fi">http://www.aalto.fi</a>		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä: Anton Kaisti			
Työn nimi: Testausalusta bluetooth-kaiuttimelle			
Korkeakoulu: Sähkötekniikan korkeakoulu			
Laitos: Automaation ja Sähkötekniikan laitos			
Professori: Translationaalinen tekniikka		Koodi: ELEC3023	
Työn valvoja: Professori Pekka Eskelinen			
Työn ohjaaja(t): DI Kim Kaisti			
<p>Tämän diplomityön tarkoituksena oli laatia Westend Musical Instruments Ltd -yrityksen uudelle bluetooth-kaiuttimelle testialusta. Tavoitteena oli suunnitella sekä valmistaa kaiuttimen piirilevyille testialusta, joka kävisi läpi piirilevyjen funktionaalisen testauksen sekä lisäisi piirilevyt tietokantaan mahdollisine virheineen. Tällaisen alustan luominen on eduksi yritykselle, sillä sen avulla voidaan uudet piirilevyt testata nopeasti ja mahdolliset viat löydetään alkuvaiheessa. Tämä säästää sekä aikaa että rahaa, kun vialliset piirilevyt voidaan havaita jo tehtaalla, missä piirilevyt valmistetaan.</p> <p>Työssä käydään ensin läpi itse piirilevyjen valmistamista sekä millaista kehitys on piirilevyvalmistuksessa ollut. Lisäksi käydään läpi eri testausmenetelmiä. Tämän jälkeen esitellään itse kaiutin, jolle tämän työn testausalusta on tehty. Loput työstä on testausalustan luomista: käytössä olevat laitteet ja mittausvälineet, testattavat elementit, LabView-testikoodin luomista sekä lopuksi testaustuloksia. Diplomityö on laadittu ohjetekstimuodossa, eli vastaavanlaisen testausalustan voisi luoda käyttämällä samoja menetelmiä kuin tässä työssä on käytetty.</p> <p>Testausalusta koostuu teholähteestä, taajuuslaskimesta, signaaligeneraattorista, DAQ-laitteesta sekä itse pohjalevystä, johon testattavat piirilevyt kytketään. Testausrutiini on laadittu LabView-ohjelmalla ja sillä ohjataan kaikkia alustaan kuuluvia laitteita sekä tehdään kaikki mittaukset. LabView-ohjelmia oli luotava kaksi, sillä kaiuttimessa on kaksi eri piirilevyä, joiden toimintaa on testattava.</p>			
Päivämäärä: 24.04.2019		Kieli: Suomi	Sivumäärä: 57
Avainsanat: Funktionaalinen testaus, testausalusta piirilevyille, kaiutin			

AALTO UNIVERSITY SCHOOLS OF TECHNOLOGY PO Box 12100, FI-00076 AALTO <a href="http://www.aalto.fi">http://www.aalto.fi</a>		ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS
Author: Anton Kaisti		
Title: Testbench for a bluetooth speaker		
School: School of Electrical Engineering		
Department: Automation and Electrical Engineering		
Professorship: Translational Engineering		Code: ELEC3023
Supervisor: Prof. Pekka Eskelinen		
Instructor(s): M.Sc. (Tech.) Kim Kaisti		
<p>The objective for this thesis was to design a test environment for a new bluetooth speaker made by the Westend Musical Instruments Ltd company. The goal was to plan and build a testbench for the two PCBs used in the speaker. The testbench would perform all the necessary testing and add each PCB to the database, including any possible fault information. A testbench like this is beneficial for the company because the new PCBs can be tested quickly, and any possible failures are discovered at an early stage. This saves the company both time and money as any malfunctional PCBs can be discovered already at the PCB manufacturing site.</p> <p>The thesis begins with some insight about PCB manufacturing and what kind of progress has been made in the PCB field. Furthermore, some of the most commonly used PCB testing methods are also listed. After this, the speaker itself is described to get an understanding of what kind of product the testbench is designed for. The rest of the thesis is about designing the testing environment: the kind of equipment being used, which elements need to be tested, how to program the LabView test code and how the testbench itself is made. The thesis is written in a guideline fashion, meaning that the reader could build a similar testbench to the one made in the thesis simply by following the same methods being used in the text.</p> <p>The testbench consists of a power supply, a frequency counter, a signal generator, a DAQ-device and the base PCB where the PCBs under test are attached. The testing software is made with LabView and it is controlling the whole test environment and taking all the required measurements. Two LabView programs had to be made for this speaker as there are two PCBs in the speaker that need to be tested.</p>		
Date: 24.04.2019	Language: Finnish	Number of pages: 57
Keywords: Functional testing, testbench for PCBs, loudspeaker		

## Alkusanat

Diplomityö on viimeinen merkkipaalu ennen koulu-urani päättymistä. Aiheeseen päädyttiin, koska Westend Musical Instruments Ltd-yritys tarvitsi testialustan uudelle kaiuttimelle, jonka kehityksessä itsekin olen ollut mukana. Haluaisin kiittää isääni ja ohjaajaani, diplomi-insinööri Kim Kaistia, joka antoi minulle mahdollisuuden laatia tämä testausalusta diplomityönä, sekä loistavasta ohjauksesta läpi koko diplomityöprosessin. Lisäksi haluan kiittää valvojaani professori Pekka Eskelistä kirjoittamisohjeista.

Espoo, 24.4.2019

Anton Kaisti

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	ii
Abstract.....	iii
Alkusanat.....	iv
Sisällysluettelo .....	1
Lyhenteet.....	3
1. Johdanto .....	4
1.1 Diplomityön tavoite.....	4
1.2 Diplomityön rakenne.....	5
2. Piirilevy .....	6
2.1 Piirilevyn historia.....	6
2.2 Piirilevyn valmistus.....	7
2.2.1 Piirilevysuunnitelman tarkastus.....	8
2.2.2 Piirilevyjen kokoaminen.....	8
2.3 Piirilevytestaus.....	10
2.3.1 In Circuit Test .....	10
2.3.2 Manuaalinen, AOI- ja Röntgen-tarkastus .....	11
2.3.3 Funktionaalinen testaus .....	11
3. Westend XFi 'unbelievable' .....	13
3.1 Kaiuttimen piirilevyrakenne .....	14
3.1.1 I2C-väylä.....	16
3.1.2 I2S-väylä.....	17
3.1.2 UART .....	17
4. Testauslaitteisto.....	19
4.1 LabView .....	19
4.1.1 National Instruments VISA.....	19
4.2 Teholähde .....	21
4.3 Taajuuslaskin.....	22
4.4 Signaaligeneraattori .....	23
4.5 National Instruments USB-6210 .....	24
4.6 Tulostin .....	25
5. PSU-kortin testaus.....	27
5.1 Testattavat elementit.....	27

5.2 Testausalusta PSU-kortille .....	29
5.3 LabView-ohjelma.....	31
5.3.1 Etupaneeli .....	31
5.3.2 Lohkokaavio .....	32
6. DSP-kortin testaus.....	38
6.1 Testattavat elementit.....	38
6.2 Testausalusta DSP-kortille .....	41
6.3 LabView-ohjelma.....	43
6.3.1 Etupaneeli .....	43
6.3.2 Lohkokaavio .....	44
7. Tulokset .....	47
8. Yhteenveto .....	49
Lähdeluettelo.....	51

## Lyhenteet

A/D	Analoginen/Digitaalinen
ACK	Acknowledgement (vahvistus)
ADC	Analog-to-Digital Converter (analoginen-digitaalinen muunnin)
AOI	Automatic Optical Inspection (automaattinen optinen tarkistus)
BT	Bluetooth
DAC	Digital-to-analog Converter (digitaalinen-analoginen muunnin)
DAQ	Data Acquisition (datankeräys)
DFM	Design for Manufacturing (valmistettavuuden tarkastus)
DSP	Digital Signal Processing (digitaalinen signaalinkäsittely)
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (sähköisesti tyhjennettävä ja ohjelmoitava lukumuisti)
ELIC	Every Layer InterConnect
GPIO	General Purpose Interface Bus
HDI	High Density Interconnect
I2C	Inter-Integrated Circuit
I2S	Inter-IC Sound
ICT	In-Circuit Test (virtapiirin sisäinen testaus)
IO	Input/Output (sisään-/ulostulo)
LSB	Least Significant Bit (merkityksettömin bitti)
MCU	Microcontroller Unit (mikrokontrolleri)
MSB	Most Significant Bit (merkitsevin bitti)
NACK	Negative Acknowledgement (negatiivinen vahvistus)
PCBA	Printed Circuit Board Assembly (piirilevyn valmistus)
PCB	Printed Circuit Board (piirilevy)
PSU	Power Supply Unit (teholähdeyksikkö)
SCL	Serial Clock Line (sarjakello)
SDA	Serial Data line (sarjadata)
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
USB	Universal Serial Bus
VI	Virtual Instrument (virtuaalinen työkalu)
VISA	Virtual Instrument Software Architecture (virtuaalisten työkalujen ohjelmistoarkkitektuuri)

# 1. Johdanto

Historian ensimmäinen kaiutin oli vuonna 1861 Johann Philipp Reisin puhelimeensa asentama elektroninen kaiutin. Kaiuttimen avulla tuotettiin selkeitä ääniä ja jopa vaimeaa puhetta. Muutama vuosi tämän jälkeen, vuonna 1876, Graham Bell patentoi ensimmäisen elektronisen kaiuttimen, jonka avulla pystyttiin tuottamaan jo selvää puhetta. [1] Tämä kaiutin oli osana puhelinta, josta Bell parhaiten tunnetaan.

Uusia kaiuttimia kehitellään jatkuvasti ja uusia tuotteita tuodaan markkinoille. Ennen kuin uudet laitteet voidaan laittaa myyntiin, on niitä kuitenkin testattava. Testauksen tavoitteena on varmistaa tuotteen toimivuus sekä laatu. Jokaisella kaiutinvalmistajalla on omat tapansa ja menetelmänsä testauksen suorittamisessa. Westend Musical Instruments Ltd on näistä kaiutinvalmistajista yksi. Yritys on tuomassa markkinoille uuden bluetooth-kaiuttimen vuonna 2019. Tämä kaiutin käyttää uutta äänentoistotekniikkaa, jota ei ole käytössä missään muussa markkinoilla olevassa kaiuttimessa. Tästä syystä myös laitteen testausta varten on luotava uusi testausalusta testauselementteineen.

## 1.1 Diplomityön tavoite

Tämän työn tavoitteena on kehittää uudelle bluetooth-kaiuttimelle testausalusta. Testattavat piirilevyt ovat: DSP-kortti, PSU-kortti, I/O-kortti sekä antennikortti. Tässä työssä käsitellään kuitenkin laajemmin vain DSP-kortin sekä PSU-kortin testausta, sillä I/O- ja antennikortit ovat melko yksinkertaiset. DSP- sekä PSU- kortteille suunnitellaan omat alustat, joihin uudet kortit on helppo liittää. Alustaan on liitetty jo ennalta testattu ja toimivaksi todettu, ns. ”kultainen kappale”, jonka avulla voidaan tarkistaa uuden kortin kommunikaatio kultaisen kappaleen kanssa. Tarkoituksena on testata kaikki korttien väliset liitännät mm. UART, I2C ja I2S, jännitteet, virrat sekä yleinen toiminnallisuus. Itse testikoodin luomiseen käytetään MCU Microchip ohjelmointiympäristöä, joka toimii C-ohjelmointikielellä. Molemmille kortteille luodaan omat sulautetut testauskoodit. Onnistuneen testauksen jälkeen kortille ladataan itse käyttöohjelma. Korttien testauksessa käytetään mm. LabView-ohjelmaa, jonka avulla luodaan helppokäyttöinen graafinen käyttöliittymä. Tämän käyttöliittymän avulla testaaja voi vaivattomasti tarkastaa uudet kortit. Tuloksesta riippuen ohjelma tulostaa etikettitulostimen avulla etiketin, jossa ilmenee läpäisikö kortti testin vai ei. Käytettävään testauslaitteistoon kuuluu myös mm. signaali generaattori, National Instrumentsin multi-I/O- mittauslaitteita, teholaähde/lähteitä sekä taajuuslaskin. Kaikkia laitteita voidaan ohjata LabView-ohjelman avulla.



## 1.2 Diplomityön rakenne

Diplomityön teoreettisessa osuudessa käydään läpi piirilevyn historiaa sekä levyjen valmistusta nykypäivänä. Lisäksi käydään läpi, millaisia testausmenetelmiä on yleisesti käytössä piirilevyvalmistuksessa, esimerkiksi ICT-tarkistus, AOI-tarkistus sekä funktionaalinen testaus. Funktionaalinen testaus on tämän työn kannalta olennaisin testausmenetelmä, sillä työn käytännön osiossa suunnitellaan testausalusta kaiuttimen piirilevyille funktionaalista testausta varten. Testausmenetelmien jälkeen esitellään työssä testattava kaiutin sekä sen piirilevyrakenne. Tässä osiossa käydään myös läpi kaiuttimen kolme kommunikatioväylää: UART, I2C sekä i2S.

Teoriaosuuden jälkeen työ on rakennettu ohjemuotoon, mikä tarkoittaa, että tekstiä seuraamalla lukija voisi laatia oman testialustan piirilevyille. Käytännön osuus alkaa testausalustassa käytettävien laitteiden läpikäymisellä sekä miten ne voidaan kytkeä tietokoneeseen, jotta niitä voisi ohjata LabView-ohjelman avulla. Tämän jälkeen on kaksi lukua itse testialustan sekä testauskoodin luomisesta, yksi osio PSU-kortin ja toinen DSP-kortin testialustasta. Työn viimeiset osiot koostuvat testaustuloksista sekä työn yhteenvedosta.

## 2. Piirilevy

Diplomityön teoreettisessa osiossa käydään läpi piirilevyn valmistusprosessi sekä piirilevyjen testausta. Miksi niitä testataan, miten niitä testataan, sekä millaisia testausmenetelmiä yleisesti käytetään. Myöhemmin työssä käydään läpi, miten testaus on käytännössä suoritettu Westend Musical Instruments Ltd -yrityksessä.

### 2.1 Piirilevyn historia

Piirilevyjä (englanniksi Printed Circuit Board eli PCB) käytetään lähes kaikissa elektronisissa laitteissa. Aikaisemmin elektronisissa laitteissa käytettiin virtapiirejä, joiden komponentit olivat kytkettynä toisiinsa yksittäisillä johdoilla. Tämä oli kuitenkin epäkäytännöllistä, sillä mitä monimutkaisempi laite sitä enemmän komponentteja tarvittiin ja näin ollen myös johtojen määrä lisääntyi. Paljon johtoja tarkoitti paljon ylimääräistä tilaa laitteessa ja lisäksi virtapiirien tarkistus oli hankalaa. [12]

Vuonna 1925 Charles Dukas patentoi prosessin, jolla eristetylle pinnalle lisättiin johtavaa ainetta [13]. Tämä oli mullistava idea, sillä sen avulla voitaisiin vähentää tai jopa poistaa kokonaan johtojen käyttö virtapiireissä. Tämä käytäntö pääsi kuitenkin kunnolla vauhtiin vasta, kun Itävaltalainen Paul Eisler valmisti ensimmäiset toimivat piirilevyt vuonna 1943. Vuonna 1947 valmistettiin ensimmäinen kaksipuolinen piirilevy. Tällä piirilevyllä komponentit olivat toisella puolella ja johdotukset toisella. Tätä menetelmää käytettiin 50- ja 60-luvuilla. [14] Yhdysvaltojen armeija patentoi vuonna 1956 menetelmän ”Process of Assembling Electrical Circuits”. Tällä menetelmällä piirrettiin ensin johdotuskuvio ja tämän jälkeen se kuvattiin sinkkilevyille. Levyn avulla kuvio voitiin painattaa happovastaisella aineella kuparikalvolle, jonka jälkeen ylimääräinen kupari voitiin syövyttää pois. 1960-luvulla monikerroksisia piirilevyjä ruvettiin valmistamaan, mikä mahdollisti entistä monimutkaisempien piirilevyjen suunnittelun. Seuraavilla vuosikymmenillä piirilevyjen koot pienenivät. Tämä johtui osittain siitä, että pintaliitoskomponentteja ruvettiin käyttämään yhä enemmän verrattuna reikien läpi kiinnitettäviin komponentteihin. 1980-luvulle asti piirilevyjen suunnittelu oli tehty käsin, mutta kun Gerber Systems julkaisi kirjan ”Gerber Format: a Subset of EIA RS-274-D; Plot Data Format Reference Book” vuonna 1980 [15], piirilevyjen suunnittelu onnistui tietokoneiden avulla. Kuvien sijaan piirilevyjen piirustukset voitiin tallentaa Gerber-tekstitiedostoihin, jotka sitten voitiin ladata koneisiin, jotka valmistivat piirilevyt. [13,14]

1990-luvulla piirilevyjen monimutkaisuus kasvoi samalla, kun koko pieneni ja hinta laski johtuen siitä, että monikerroksisten piirilevyjen käyttö yleistyi. Tämän teknologian avulla myös yhdistelmäpiirilevyt, joissa on mukana sekä jäykkä että elastinen osa, yleistyivät [14]. Mikro-läpivientiteknologia tuli käyttöön vuonna 1995, ja tästä johtuen HDI (High Density Interconnect) piirilevyjen tuotanto mahdollistui. HDI-piirilevyillä mikro-läpiviennit ovat nykypäivänä halkaisijaltaan 0,006 mm tai vähemmän, mikä taas

mahdollistaa todella tiheän johdotuksen. Vuonna 2010 käyttöön tuli ELIC-teknologia (Every Layer InterConnect), jonka avulla voidaan yhdistää monikerroksisissa piirilevyissä kaksi kerrosta sen jälkeen, kun piirilevykerrokset on koottu. Tämä tuo joustavuutta tuotantoon sekä antaa mahdollisuuden suunnittelijalle maksimoida tilankäyttö piirilevyllä [16].

## 2.2 Piirilevyn valmistus

Piirilevyn valmistuksella, englanniksi ”Printed Circuit Board Assembly (PCBA)”, tarkoitetaan prosessia, jonka avulla piirilevysuunnitelmasta valmistetaan toimiva piirilevy. Nykypäivänä useat varsinkin pienet yritykset ulkoistavat piirilevyvalmistuksen.

Valmistusprosessi alkaa aina piirilevyn pohjasta. Tämä pohja koostuu useasta materiaalista:

**Alusmateriaali** – määrittelee piirilevyn jäykkyyden. Materiaalin valinta riippuu siitä, kuinka jäykän piirilevyn tilaaja haluaa.

**Kuparikalvo** – jokaiselle piirilevyn kerrokselle tulee ohut kuparikalvo. Tästä tehdään kuparijuotokset.

**Juotosmaski** – tämän kerroksen tehtävänä on eristää kuparijuotokset toisistaan sekä muista johtavista aineista. Juotosmaskissa on reikiä kohdissa, joihin komponentit kiinnitetään. Juotosmaski tuo lisäksi piirilevyille sen tunnusomaisen vihreän värin.

**Silkkipohja** – päälimmäisin kerros on silkkipohja (engl. ”silkscreen”). Tällä kerroksella tehdään merkintöjä piirilevyille. Nämä ovat esimerkiksi symboleita tai kirjaimia, jotta komponenttien erottaminen toisistaan olisi helpompaa. [17]

Näistä materiaaleista ainoastaan alusmateriaali on eroavainen eri piirilevyjen välillä. Materiaali riippuu siitä, miten jäykkää piirilevyä tilaaja haluaa. On olemassa kolme niin sanottua perusvaihtoehtoa piirilevyille ja nämä ovat: **jäykkä**, **joustava**, sekä **metallipohjainen** [17]. Jäykkä piirilevy on yleisin piirilevyvaihtoehto. Tämä on yleensä tehty lasikuidusta. Halvempia mutta vähemmän kestäviä vaihtoehtoja ovat esimerkiksi epoksipohjaiset piirilevyt. Joustavat piirilevyt on usein tehty Kapton-muovista ja nämä piirilevyt kestävän hieman taivuttelua. Metallipohjaiset piirilevyt on, kuten nimi kertoo, tehty metallipohjalle. Näitä piirilevyjä käytetään usein siinä tapauksessa, että piirilevy altistuu kuumuudelle. Metallipohja jakaa lämpöä tasaisemmin piirilevyille kuin esimerkiksi lasikuitu. Tämä johtaa siihen, että lämpö siirtyy nopeammin ja lämpöherkät komponentit ovat paremmin suojattuna.

Komponenttien liittäminen piirilevyille tapahtuu kahdella tapaa: pintaliitoksilla tai läpivientiliitoksilla. Pienet komponentit, kuten vastukset tai pienet LED-valot, ovat usein pintaliitoskomponentteja (engl. ”Surface Mounted Components”). Näiden komponenttien juottaminen tapahtuu samalla puolella, jolla itse komponentti on. Tämä säästää paljon tilaa piirilevyllä ja mahdollistaa molemminpuolisen käytön, koska piirilevyn läpi ei tarvitse tehdä isompaa läpivientireikää. Koska komponentit ovat

juotettuna samalla puolella, tämä juotostapa on hieman heikompi ja piirilevyjä on kohdeltava varovaisemmin, etteivät komponentit irtoaisi levyltä. Läpivientiliitokset ovat vahvempia, sillä niissä liitokset on viety piirilevyn läpi ja juotettu alapuolelta. Tätä liitostapaa käytetään, kun kyseessä on isoja komponentteja, jotka tarvitsevat jyrkemmän juotoksen. Näitä juotoksia on usein myös helpompi korjata tai juottaa uudestaan, sillä ne ovat yleensä isompia verrattuna pintaliitos- komponentteihin. [18]

### 2.2.1 Piirilevysuunnitelman tarkastus

Ennen kuin piirilevyn valmistus voidaan aloittaa, on piirilevysuunnitelmalle tehtävä tuotteen valmistettavuustarkastus (engl. Design for Manufacturing check, DFM). Tällä tarkastuksella varmistetaan, että piirilevysuunnittelussa ei ole virheitä tai vajaavaisuuksia. Näitä virheitä voivat olla esimerkiksi liian pieni kuparijuotoksien väli, joka voi johtaa oikosulkuihin tai muihin vikoihin. Muita virheitä, joita DFM-tarkastuksella voidaan löytää, ovat liian ohuet kuparijuotokset. Tämä virhe ei välttämättä johda virheeseen kaikissa piirilevyissä, mutta koska juotos on ohut, se saattaa vaurioitua helposti, mikä taas johtaa isompaan hylkäysprosenttiin valmiissa piirilevyissä. [19]

DFM-tarkastus on tärkeä tehdä ennen kuin piirilevyjä ruvetaan tuottamaan, sillä se vähentää huomattavasti virheitä valmiissa piirilevyssä. Tämä taas pienentää tuotantokustannuksia ja eliminoi lisäkustannuksia. Kustannukset laskevat sen takia, että tarkastus pienentää hylättyjen piirilevyjen määrää.

### 2.2.2 Piirilevyjen kokoaminen

Piirilevyjä kokoavia yrityksiä on nykypäivänä lukemattomia. Kokoamisprosessi on kuitenkin saman tyyppinen kaikilla valmistajilla. Tässä osiossa on esitettyä esimerkki siitä, miltä kokoamisprosessi näyttää. Kyseinen valmistusprosessi on käytössä PCBCart-yrityksellä [17].

#### Vaihe 1:

Piirilevyjen kokoaminen alkaa aina juotostahnan lisäämisellä. Piirilevyn päälle asetetaan ruostumattomasta teräksestä valmistettu kuvio (stensiili), jossa on reikiä vain tietyissä kohdissa. Nämä kohdat ovat ne, mihin komponentit juotetaan kiinni. Kone, joka lisää juotostahnan, levittää sen tasaisesti koko kuvion päälle, jotta tarkoituksenmukaiset kohdat täyttyvät tahnalla. Tämän jälkeen kuvio poistetaan ja piirilevyllä jää jäljelle juotostahnaa ainoastaan niihin kohtiin, mihin komponentit kiinnitetään. PCBCart yritys käyttää tinapohjaista juotostahnaa, joka sisältää 96,5% tinaa, 3% hopeaa sekä 0,5% kuparia.

**Vaihe 2:**

Prosessin toinen vaihe on pintaliitoskomponenttien lisääminen. Aikaisemmin tämä vaihe suoritettiin käsin pinsettien avulla, mutta nykypäivänä robotti tekee tämän automaattisesti. Robotti nostaa komponentit piirilevylle piirilevysuunnitelman mukaisesti ja asettaa ne niille paikoille, mihin edellisessä vaiheessa lisättiin juotostahnaa.

**Vaihe 3:**

Kun juotostahna sekä pintaliitoskomponentit on laitettu paikoilleen, on niiden kiinnijuottamisen vuoro. Piirilevy siirretään liukuhihnalle ja sen avulla uuniin. Uunin lämpötila on noin 250 °C. Tämä lämpötila sulattaa juotostahnan komponenttien alla ja ne yhdistyvät piirilevyyn. Liukuhihna vie piirilevyn muutaman matalalämpöisemmän uunin läpi, jotta juotos viilenisi hallitusti. Hallittu viileneminen johtaa vahvempaan liitokseen komponenttien ja piirilevyn välillä. Jos piirilevylle on tarkoitus asentaa komponentteja molemmille puolille, on vaihe 2 ja 3 suoritettava erikseen molemmiin puoliin.

**Vaihe 4:**

Valmistuksen seuraava vaihe on laaduntarkistus. Tässä vaiheessa tarkistetaan edellisen kahden vaiheen tulos. Komponentit voivat herkästi liikkua, kun piirilevy siirretään liukuhihnalle, ja tästä johtuen virheitä voi ilmaantua. Virhe voi olla esimerkiksi oikosulku, jos jokin komponentti on liikahtanut ja näin ollen yhdistynyt väärään kohtaan. Laaduntarkistus suoritetaan yleisimmin joko manuaalisesti, automaattisella optisella tarkastuksella tai röntgentarkastuksella. Mikäli tilattu piirilevyerä on pieni, voi manuaalinen tarkastus olla riittävä. Jos erät sen sijaan ovat isoja, käytetään usein automaattista optista tarkastusta (engl. Automatic Optical Inspection, AOI). Optinen tarkastus tapahtuu kameroiden avulla. Kameran on sijoitettava eri paikkoihin, jotta ne pystyvät näkemään eri liitoskohdat. Liitoskohdat heijastavat valoa eri tavalla riippuen liitoksen laadusta, ja näin AOI pystyy erottamaan heikkolaatuiset liitokset. Kone suorittaa tämän prosessin nopeasti, mikä myös mahdollistaa nopean piirilevyjen läpikäynnin, jos erä on suuri. Kolmas tarkistusmuoto on röntgentarkistus. Röntgentarkistusta käytetään harvemmin kuin kahta muuta tarkistusmuotoa. Tätä tarkistusmuotoa käytetään silloin, kun piirilevy on monimutkainen tai se on monikerroksinen. Silloin röntgenillä voidaan nähdä kerroksien läpi ja löytää mahdollisesti piileviä virheitä, joita ei silmämääräisesti pystytä näkemään.

**Vaihe 5:**

Vaiheessa viisi lisätään mahdolliset reikiin kiinnitettävät komponentit. Näitä komponentteja ei voida lisätä vaiheessa 3, sillä ne yhdistetään reikiin, jotka menevät koko piirilevyn läpi ja juotostahnasta ei silloin ole hyötyä. Reikiin kiinnitettävien komponenttien kiinnitykseen käytetään kahta eri menetelmää. Ensimmäinen näistä on manuaalinen juottaminen. Siinä tyypillisesti yksi henkilö vastaa yhden komponentin juottamisesta. Kun kyseinen komponentti on juotettuna, piirilevy annetaan seuraavalle

henkilölle, joka juottaa seuraavan komponentin ja niin edespäin, kunnes kaikki komponentit ovat paikoillaan. Tämä voi kuitenkin olla hidasta, jos piirilevyllä on asennettava monta reikiin kiinnitettävää komponenttia. Tästä syystä useat yritykset yrittävät minimoida reikiin kiinnitettävien komponenttien käytön piirilevysuunnittelussaan. Manuaalinen juottaminen ei kuitenkaan aina ole mahdollista. Toinen vaihtoehto on aaltomainen juottaminen (engl. Wave Soldering). Tämä on käytännössä automatisoitu versio manuaalisesta juottamisesta. Komponentit asetetaan ensin reikiinsä, jonka jälkeen piirilevy siirretään liukuhihnalle. Tämän jälkeen liukuhihna kulkee erikoisuunin läpi, joka lisää juotosainetta piirilevyn pohjalle kaikkiin pinneihin samanaikaisesti. Tällainen menetelmä onnistuu ainoastaan yksipuolisilla piirilevyillä, sillä juotosaine tarttuu kaikkeen piirilevyn alapuolella olevaan ja näin ollen tuhoaisi tällä puolella olevat komponentit.

#### **Vaihe 6:**

Viimeinen vaihe suoritetaan, kun kaikki komponentit ovat asennettuna ja piirilevy on valmis. Tämä vaihe koostuu lopputarkastuksesta sekä piirilevyn funktionaalisesta verifiointista. Tässä vaiheessa piirilevy käy läpi tarvittavat testit normaaliolosuhteissa, jotta sen toimivuus saadaan tarkistettua. Testeissä voidaan mitata esimerkiksi virtoja, jännitteitä tai signaaleita piirilevyllä ja verrata niitä odotusarvoihin. Jos arvot poikkeavat huomattavasti, on piirilevyllä jokin virhe.

## **2.3 Piirilevytestaus**

Tämän työn oleellisin osa on valmiin piirilevyn testaus sekä testausalustan laatiminen Westend Musical Instruments Ltd -yritykselle. Kun piirilevy on koottu, tulisi se vielä testata ennen kuin se lähetetään tilaajalle. Westend Musical Instruments Ltd -yrityksellä ei ole tällä hetkellä vielä testausalustaa piirilevyille, joten tilatut piirilevyt tulevat yritykselle testaamatta. Tarkoituksena on siis luoda kyseinen testausalusta ja testausmenetelmä, jotta vastaavaa alustaa voisi käyttää myös suoraan tehtaalla, jossa piirilevyt valmistetaan. Tämä säästäisi aikaa ja rahaa, sillä vialliset piirilevyt karsiutuisivat pois jo ennen kuin ne lähtevät tehtaalta. Testaustapoja on erilaisia, ja tässä osiossa tutustutaan muutamaan yleisesti käytössä olevaan menetelmään.

### **2.3.1 In Circuit Test**

Lyhenne ICT tulee englannin kielestä sanoista In Circuit test. ICT-menetelmä on todella nopea ja jos kyseessä on iso erä piirilevyjä, niin testaus sujuu nopeasti ja halvalla. Tämän takia ICT-menetelmä on ylivoimaisesti suosituin testausmenetelmä, kun tuotantovolyymit ovat suuria. ICT-menetelmä toimii niin, että testattava piirilevy asetetaan neulapedin päälle. Jokainen neula on kosketuksessa tiettyyn mittauspisteeseen ja niiden avulla voidaan mitata kaikkien tai lähes kaikkien komponenttien toiminta. Tällä menetelmällä voidaan nopeasti ja helposti testata

piirilevyn komponenttien toimivuus. ICT-testillä pystytään helposti havaitsemaan esimerkiksi: väärät ja puuttuvat komponentit, oikosulut, juotosviat tai vastusten ja kapasitanssien arvot, sillä jokainen komponentti tarkistetaan yksittäisesti [20]. ICT-testi voidaan myös suorittaa niin sanotuilla ”flying probe” -mittauspisteillä. Tällaisia mittauspisteitä käytetään usein silloin, kun testattavia piirilevyjä on paljon erilaisia tai tuote-erä on pieni. Näissä tapauksissa neulapetien valmistus tai säilytys voi olla haastavaa ja kalliimpaa. ”Flying probe” -mittauspisteet toimivat niin, että piirilevy pidetään paikallaan ja mittapäät käyvät läpi yksitellen jokaisen komponentin. Mittapäät voivat liikkua X-, Y- ja Z-akseleilla ja näin ollen ylettyä kaikkiin komponentteihin. Liikkuvien mittapäiden etu verrattuna neulapetiin on se, että neulapetialustaa ei tarvitse tehdä, mikä säästää aikaa testauksessa. Lisäksi muutoksia on helppo tehdä, sillä mittauspisteiden paikkoja voidaan ohjelmoida uudestaan [21]. Liikkuvien mittauspäiden avulla suoritettavat testit ovat kuitenkin yleisesti hitaampia kuin neulapedeillä suoritettavat testit ja niiden hinta on yleisesti korkeampi.

### 2.3.2 Manuaalinen, AOI- ja Röntgen-tarkastus

AOI eli Automated Optical Inspection, manuaalinen tarkastus sekä röntgentarkastus eivät sinänsä ole piirilevyn testausta vaan laaduntarkastusta. Manuaalinen tarkastus riittää usein silloin, kun piirilevy on suhteellisen yksinkertainen ja käytössä olevat komponentit voidaan silmämääräisesti erottaa toisistaan. Manuaalista tarkastusta suoritetaan usein vain silloin, kun tuotantoerät ovat pieniä. Jos tuotantoerät ovat suuria tai piirilevyn ulkoasu on monimutkainen, turvaudutaan usein AOI-tarkastukseen. AOI on, kuten nimi kertoo, automatisoitu optinen tarkastus. AOI-laitteen toiminta perustuu siihen, että piirilevystä otetaan paljon kuvia eri kulmista ja eri valaistuksilla. Kuvien avulla laite pystyy erottelemaan heikot juotokset ja liitokset, sillä ne heijastavat valoa eri tavalla verrattuna oikeaoppisiin juotoksiin [17]. AOI-laitteen avulla tarkistus käy myös nopeasti, ja jos tuotantoerät ovat suuria, kannattaa AOI-laitetta käyttää manuaalisen tarkastuksen sijaan. Röntgen-tarkistus on myös yksi laaduntarkastusmuoto. Tämä tarkastusmuoto ei kuitenkaan ole kovin suosittu, sillä se on hitaampi kuin AOI-laitteella tehty tarkastus. Röntgen-tarkistusta tai AXI-tarkistusta (engl. Automated X-ray Inspection) käytetään useimmin monikerroksisten piirilevyjen tarkistukseen, sillä sen avulla voidaan löytää vajaavaisuuksia, joita ei ulospäin huomaisi [22].

### 2.3.3 Funktionaalinen testaus

Funktionaalinen testaus on usein piirilevyvalmistuksen viimeinen vaihe, joka suoritetaan sen jälkeen kuin visuaalinen tarkastus on suoritettu esimerkiksi AOI-tarkastuksella [23]. Funktionaalisen testauksen tavoitteena on varmistaa piirilevyn toimivuus. Periaatteena tässä testauksessa on, että piirilevyn toimintoja simuloidaan ja mitataan testausympäristössä. Yleisiä testattavia ominaisuuksia ovat esimerkiksi jännite- ja

virtamittaukset, kommunikaatio piirilevyn ja testausalustan välillä sekä mahdollisten fyysisten kytkimien toiminta.

Funktionaalinen testausympäristö rakentuu testausalustan ympärille. Alustan on tarkoitus simuloida sitä ympäristöä, jossa testattavaa piirilevyä on tarkoitus käyttää. Alustaan liitetään tietokone, joka suorittaa itse testauksen. Lisäksi alustaan liitetään tarvittavat teholähteet, mittauslaitteet sekä signaalit, jotta kaikki testattavat asiat saataisiin verifioitua. Usein käytetty ohjelma testausohjelman luomisessa on LabView. Sen avulla voidaan helposti kommunikoida eri mittausvälineiden välillä. Tässä työssä käytetään nimenomaan LabView-ohjelmaa, joten lisää sen toimivuudesta on kerrottu osiossa 3.1. Mikäli tuotteessa on älyä, eli siinä on prosessori tai mikrokontrolleri ohjaamassa sen toimintaa, on sitä varten lisäksi luotava ohjelma, joka pystyy testaamaan kortin kommunikaatio- sekä IO-linjoja. Testiohjelma on usein erilainen kuin lopputuotteessa oleva ohjelma, sillä lopullinen ohjelma ei yleensä sovellu testaustarkoituksiin.

Koska funktionaalinen testaus simuloi piirilevyn toimivuutta sen käyttöolosuhteissa, on se myös yhdistettävä testialustaan niin kuin se lopullisessa tuotteessa olisi [24]. Jos lopulliseen tuotteeseen kuuluu useita piirilevyjä, joiden kanssa testattava piirilevy kommunikoi, on myös niitä tai niiden toimintoja vastaavia piirilevyjä käytettävä testialustassa. Näin saadaan mahdollisimman hyvin testattua piirilevyn toimivuus ennen kuin se lähetetään tilaajalle.

Funktionaalisen testauksen hyviä puolia on, että sillä voidaan verifioida piirilevyn toimivuus ennen kuin se lähetetään tilaajalle. Tämä säästää aikaa ja rahaa tuotteen lopullisessa testauksessa, sillä virheellisten piirilevyjen määrä saadaan karsittua jo aikaisessa vaiheessa. Funktionaalinen testaus on kuitenkin melko haastava toteuttaa, jos kyseessä on monimutkainen piirilevy. Koska käytännössä jokaisella piirilevymallilla on eri toiminnot, on eri piirilevyille tehtävä omat testausalustansa. Tästä johtuen standardialustojen kehittäminen on ollut melko hidasta piirilevyteollisuudessa. [24]

Kun funktionaalista testausta suoritetaan, on usein tuloksena joko hyväksytty tai hylätty, menemättä sen syvällisemmin siihen, mikä osa piirilevystä ei toimi. Tämän työn tavoitteena onkin luoda helppokäyttöinen testausalusta, joka myös ilmoittaisi tarkalleen mikä/mitkä osat piirilevystä hylättiin. Tämän avulla viat voitaisiin nopeasti korjata ainoastaan vaihtamalla vialliset komponentit.



### 3. Westend XFi 'unbelievable'

Westend XFi 'unbelievable' on bluetooth-kaiutin, jonka piirilevyille tässä työssä kehitetään testausalusta. Westend Musical Instruments Ltd -yritys on kehittänyt pienikokoista äänentoistoa 7 vuotta. Työn ensimmäinen vaihe on saatettu loppuun ja ensimmäinen Westend XFi -teknologiaa käyttävä tuote, pienikokoinen langaton hifi-kaiutin Westend 'unbelievable', on saatu tuotantovalmiiksi. Tähän mennessä laitteita on tuotettu noin 90 kappaletta ja asiakaspalaute on ollut erinomaista.

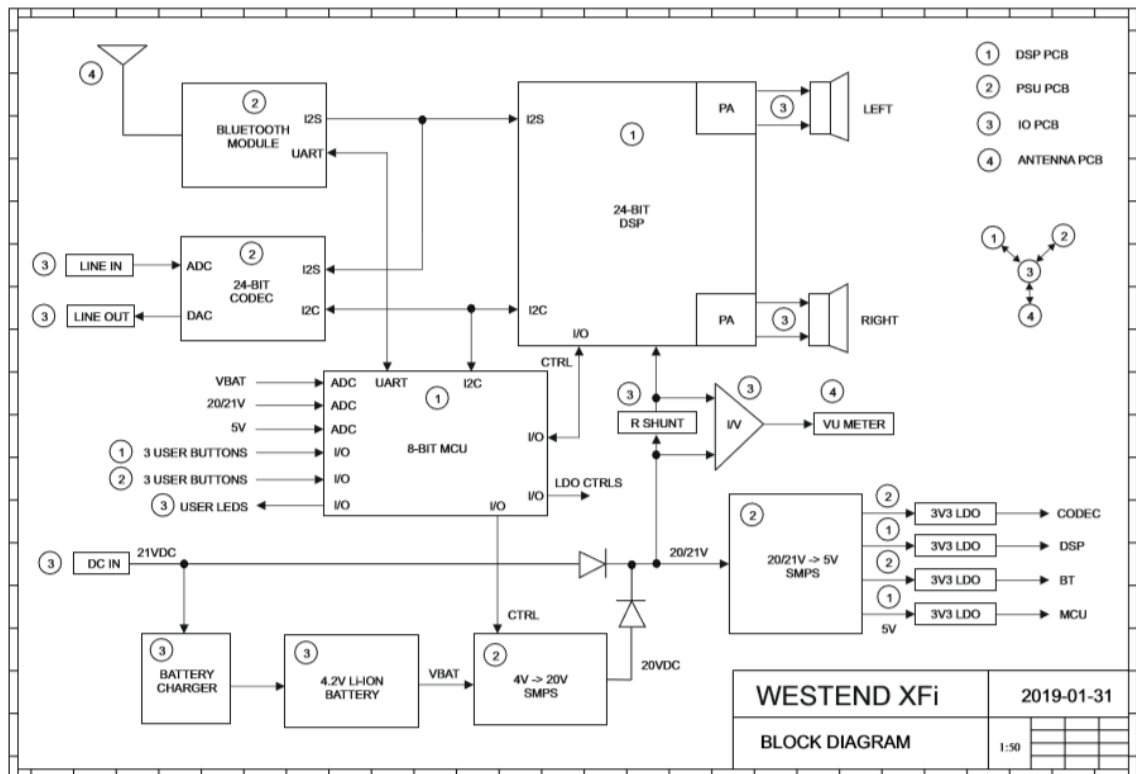
Laitteen etuihin kuuluu erinomainen äänentoisto, täydellinen stereo, pieni koko, akkukäyttöisyys, hillitty ulkomuoto sekä suomalainen valmistus. Lisäksi laite on suunniteltu ympäristöystävälliseksi, sillä siinä käytetään 80% kierrätettyä materiaalia, kuten alumiinia. Lisäksi kaiuttimen myyntipakkaus on valmistettu puusta, joten myös tässä säästytään turhalta muovijätteeltä. Kaiutin on myös luotu kestämään vuosikausia ja tarvittaessa tuotteet pystytään korjaamaan entiselleen ilman että tuote täytyy uusia kokonaan. Tuote voidaan myös purkaa osiin ja osat kierrättää.

Kaiuttimen tärkein ominaisuus on kuitenkin äänenlaatu. Pienikokoisessa kaiuttimessa ei riitä ainoastaan hyvä akustinen rakenne ja hyvä elektromekaaninen ratkaisu muodostamaan laadukasta ääntä. Tämän takia yritys on suunnitellut täysin uudet kaiutinelementit sekä rakentanut kokonaan uuden digitaalisen teknologian asiantuntevassa tiimissä, johon kuuluu musiikin, digitaalisen äänitekniikan sekä sähkötekniikan asiantuntijoita. Tuote muodostaa uuden laitekategorian: "kannettava hifilaite". Pienen kokonsa ansiosta hifi-tason ääni voidaan tuoda lähes mihin tilaan tahansa, myös silloin kun sähköä ei ole tarjolla. Laite soveltuu kuluttajalle, joka haluaa kuunnella musiikkia langattomasti ja joka haluaa tuoda laadukasta äänentoistoa mukanaan eri elämäntilanteisiin esimerkiksi kesämökille, matkoille, työhuoneeseen tai kotioloihin.

#### **Kaiuttimen ominaisuudet:**

- Koko: 18,5 x 7,5 x 7 cm
- Paino: 1100 g
- Taajuusalue: 30-20 000 Hz
- Akun kesto: n. 8 h
- 5 ääniasetusta (4 + yötila)
- Alumiinirakenne kierrätetystä alumiinista
- Neljä Westend XFi -tekniikkaan perustuvaa kaiutinelementtiä
- Linja sisään/Linja ulos
- Bluetooth aptX
- VU-mittari
- Studiotason digitaalinen äänenkäsittely
- Suunniteltu ja valmistettu Suomessa
- Tarvittaessa korjattavissa

### 3.1 Kaiuttimen piirilevyrakenne



Kuva 1: Lohkokaavio piirilevyjen keskeisimmillä funktioilla sekä keskeiset kommunikaatiot piirilevyjen välillä

Kaiutin koostuu neljästä eri piirilevystä:

- 1) DSP-kortti (Digital Signal Processing, eli digitaalinen signaalinkäsittely)
- 2) PSU-kortti (Power Supply Unit, eli teholähdeyksikkö)
- 3) IO-kortti
- 4) Antennikortti

Pohjakorttina toimii IO-kortti, johon DSP- sekä PSU-kortit ovat kummatkin yhdistettynä 2x20 piikkirimaliittimillä ja antennikortti juotettuna kiinni juotosnastalla. Piirilevyasetelma johtuu siitä, että kaiuttimen toiminnot ovat jaettuna kaikille korteille sekä siitä, että se säästää tilaa itse kaiuttimessa. Kuvassa 1 on esitettyä eri piirilevyjen keskeiset toiminnot sekä miten ne kommunikoivat keskenään. Kuvassa numerot osoittavat millä kortilla kyseinen toiminto on. Esimerkiksi BT-moduuli ja koodekki on numeroituna kakkosella eli ne ovat PSU-kortilta.

#### DSP-kortti (1):

Tällä kortilla on 24-bittinen DSP, joka toimii I2S-isäntänä (Inter-IC Sound) ja I2C-orjana (Inter-Integrated Circuit). DSP voi käyttää kahta näytteenottotaajuutta 44,1kHz sekä 48kHz ja siinä on lisäksi kaksi 20W tehovahvistinta. MCU (Microcontroller unit) -prosessori, joka ohjaa kaiuttimen toimintoja (mm. I2C-isäntä, UART, A/D-muuntimia IO-ajastimia) on myös tällä kortilta. Prosessorin ohjelmointia varten kortilla on PICKIT-liitin, jotta uusin ohjelmaversio saadaan helposti ladattua kortille. DSP-kortilla on myös ulkoinen EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory), joka toimii

I2C-orjana. Tänne voidaan tallentaa tietoa, jota tarvitaan, kun kaiutin käynnistetään uudestaan sammuttamisen jälkeen. Näitä tietoja ovat esimerkiksi äänenvoimakkuusasetukset. Kortilla on lisäksi kolme näppäintä: äänenvoimakkuus ylös, äänenvoimakkuus alas sekä äänetön tila -näppäin.

#### **PSU-kortti (2):**

PSU-kortin keskeisimmät osat ovat BT-moduuli, koodekki sekä jännitehakkurit. BT-moduulissa (Bluetooth Classic) on SBC, APTX- sekä AAC- koodekit, se toimii I2S-orjana ja kommunikoi UART:n avulla MCU-prosessorin kanssa. Koodekilla on A/D- sekä D/A-muunnin ja se toimii I2S- ja I2C-orjana. Kortilla on kaksi jännitehakkuria, jotka muuntavat jännitteet 4V->20V sekä 20V/21V->5V. Myös PSU-kortilla on kolme näppäintä: esiasetus-, yö-tila-, sekä virtanäppäin.

#### **IO-kortti (3):**

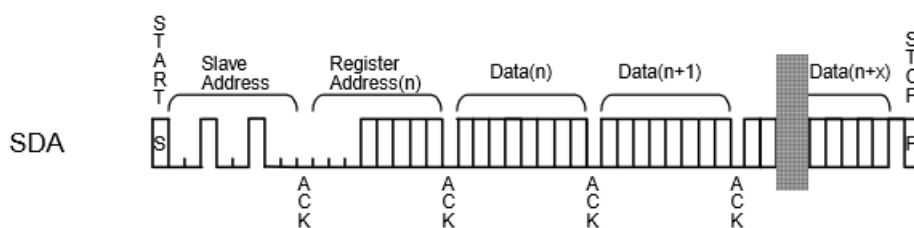
Tämä kortti toimii pohjakorttina, johon kolme muuta korttia yhdistetään. Pohjakortilla ei ole monimutkaista teknologiaa vaan tärkeintä tällä kortilla on, että signaalit kulkevat muiden korttien välillä. IO-kortilta löytyy teholähteen sisääntulo, Line-IN sekä Line-Out-liittimet, 4.2V Li-ION akku sekä sen laturi sekä VU-mittarin virta-aistin, joka saa antennikortin VU-mittarin värähtelemään.

#### **Antennikortti (4):**

Antennikortti on hyvin yksinkertainen. Tällä kortilla on ainoastaan VU-mittari sekä itse antenni. Antennina käytetään 50 Ohmin rakoantennia, joka on viritetty BT-taajuuksille (2.400-2.485GHz).

### 3.1.1 I2C-väylä

Korteilla käytetään kolmea eri kommunikaatioväylää. Nämä ovat **I2C**, **I2S** sekä **UART**. I2C (engl. Inter-Integrated Circuit bus) on synkroninen, 2-johtiminen kaksisuuntainen sarjaväylä. Toinen johdin on sarjadata (SDA, serial data line), joka kuljettaa tietobitit, ja toinen on kellopulssilinja (SCL, serial clock line), joka tahdistaa tietobitit. Väylän laitteet jaetaan isäntä- (master) sekä orjalaitteiksi (slave). Ainoastaan isäntälaitteet voivat käynnistää tiedonsiirron, mutta molemmat laitteet voivat lähettää sekä vastaanottaa tietoa, kun tiedonsiirto on käynnistetty. Jokaisella laitteella I2C-väylällä on oma osoite, jotta ne erotetaan toisistaan. Tiedon lähettäminen orjalaitteelle toimii niin, että isäntä lähettää START-komennon orjan osoitteella sekä asettaa viimeisen bitin nollaksi (lukeminen = 1, kirjoittaminen = 0). Kun orja on lähettänyt vahvistuksen, lähettää isäntä vielä rekisterin, johon se haluaa kirjoittaa tiedon. Orjalaite vahvistaa vielä kerran olevansa valmis, jonka jälkeen isäntä lähettää tiedon sekä lopuksi STOP-komennon. [25] Kuvassa 2 on esitettyä tiedon lähettäminen orjalaitteelle.



Kuva 2: Datan lähettäminen orjalaitteelle I2C väylän avulla [28]

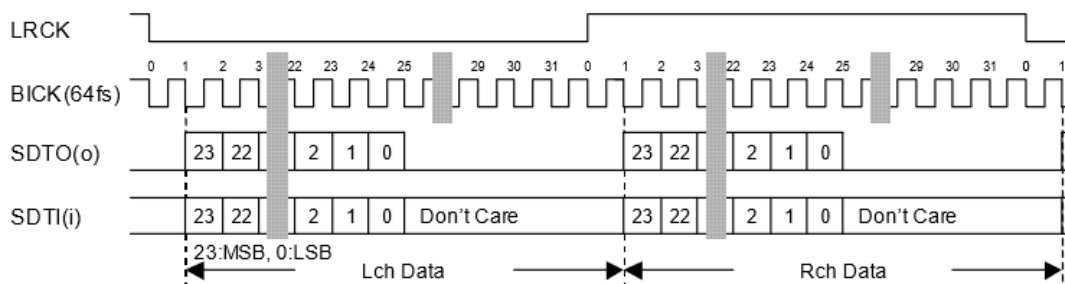
Lukeminen orjalta tapahtuu lähes samalla tavalla, mutta siihen lisätään muutama vaihe. Isäntä lähettää jälleen kirjoitusbitin 0 sekä rekisterin, josta lukeminen tapahtuu. Kun orja on vahvistanut rekisterin, isäntä lähettää uudestaan START-komennon sekä orjan osoitteen ja viimeiseksi bitiksi tällä kertaa 1. Tämä vapauttaa SDA-linjan, jotta orja pystyy lähettämään dataa takaisin isännälle. Jokaisen vastaanotetun tavun jälkeen isäntä lähettää ACK (acknowledgement) -viestin orjalle ilmoittaakseen, että tieto on vastaanotettu. Kun isäntä on saanut odotetun määrän tavuja, lähettää se NACK (negative acknowledgement) -komennon sekä lopuksi STOP-komennon. [25]

Tässä kaiuttimessa MCU-prosessori toimii I2C-isäntänä ja koodekki sekä DSP I2C-orjina. Esimerkkejä tiedoista, joita lähetetään näiden välillä on:

- 1) Koodekin toimintamoodin asetus (DAC on/ADC on, DAC off/ADC on, DAC on/ADC off tai DAC off/ADC off) riippuen siitä, miten linja-sisään/linja-ulos-liittimiin on kytkeydytty. Tilat tutkitaan MCU:lla kahdella I/O-signaalilla.
- 2) DSP:n ohjaus (esim. 5 esiasetusta, äänetön tila, äänenvoimakkuudet jne.)
- 3) Ulkoinen EEPROM asetusten tallentamiseen

### 3.1.2 I2S-väylä

I2S (engl. Inter-IC Sound) on elektroninen sarjaväylä, jonka avulla integroidut piirit lähettävät audiodataa keskenään elektronisissa laitteissa. I2S sarjaväylässä on 5 signaalia: sarjamuotoiset datasignaalit (serial data out/in, SDO ja SDI), sanavalinta signaali (word select, WS, joka samalla toimii näytteenottotaajuutena esim. 48kHz), masterkello (MCLK = 4xSCL, esim. 12.288MHz) sekä (bittikello)signaali (serial clock, SCL, esim. 3.072MHz).



Kuva 3: I2S väylällä lähetetty signaali. LRCK = MCLK [28]

Kuvassa 3 on esitettynä signaali, joka lähetetään I2S-väylällä. Datasignaalit lähetetään niin, että merkittävin bitti (Most Significant Bit, MSB) tulee ensin, koska signaalin lähettäjällä ja vastaanottajalla voi olla eri sanapituudet. Mikäli lähettäjän sanapituus on pidempi kuin vastaanottajan, vähiten merkittävät bitit (Least Significant Bit, LSB) jätetään huomioimatta. Jos taas lähettäjän sanapituus on lyhyempi, viimeiset bitit laitetaan automaattisesti nolliksi. Ei näin ollen ole tärkeää lähettäjän kannalta tietää, kuinka monta bittiä vastaanottaja pystyy käsittelemään eikä vastaanottajan myöskään tarvitse tietää, kuinka monta bittiä on lähetetty, vaan merkittävimmällä bitillä on aina määrätty paikka. [26]

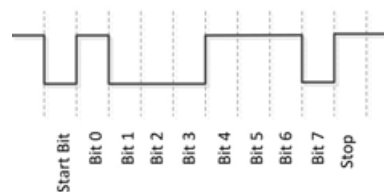
Sanavalintasignaali ilmaistaan, mitä kanavaa käytetään. Jos WS = 0, käytössä on vasen kanava, ja vastaavasti jos WS = 1, käytössä on oikea kanava. WS vaihtuu aina yhden kelloaikavälin ennen kuin MSB on lähetetty. Tämä synkronoi kellot lähettäjän sekä vastaanottajan välillä datan lähettämistä varten. Lisäksi se antaa vastaanottajalle aikaa tallentaa edellinen sana sekä tyhjentää sisääntulo seuraavaa sanaa varten. [26]

### 3.1.2 UART

UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) on joko oma mikropiiri tai fyysinen piiri mikrokontrollerissa. Sen tarkoituksena on lähettää sekä vastaanottaa dataa kahden UARTin välillä. UART käyttää vain kahta johtoa laitteiden välillä ja nämä ovat kytkettynä niin että Tx (Transmitter) -pinni UART-lähettäjältä on kytkettynä Rx (Receiver) -pinniin UART-vastaanottajaan. Data lähetetään tahdistamattomana (Asynchronous) tarkoittaen, että UART lähettää sekä vastaanottaa dataa ilman

kellosignaalia. Sen sijaan dataan lisätään aloitus- sekä lopetusbitit, jotta UART tietää, milloin lukeminen aloitetaan ja lopetetaan. Kun aloitusbitti on vastaanotettu, UART lukee sisääntulevat bitit tietyllä siirtonopeudella (baud rate).[27] Yleisesti käytetty siirtonopeus on 9600 bittiä sekunnissa, mutta siirtonopeus voi olla korkeimmillaan jopa 3M bittiä sekunnissa.

UART lähettää aina datan pakkauksissa. Pakkauksessa on aina yksi aloitusbitti, 5-9 databittä, 0-1 vastaavuusbittiä (parity) sekä 1-2 lopetusbittiä. Vastaavuusbitti on tarkistuksena siitä, onko data muuttunut lähetyksen aikana. Vastaavuusbitti laskee bitit arvoilla 1 ja niiden perusteella merkitsee vastaavuusbitin. Jos 1-arvoisia bittejä on parillinen määrä, merkitään vastaavuusbitiksi 0 ja vastaavasti 1, jos niitä on epätasamäärä. Bittien arvot voivat muuttua lähetyksen aikana esimerkiksi, jos datansiirtovälit ovat pitkät tai siirtonopeus poikkeaa liikaa UARTien välillä. Mikäli vastaavuusbittiä käytetään, databittien määrä on 5-8. Tämän työn kaiuttimessa datapakkaus on esitetty kuvassa 4. Tähän kuuluu 1 aloitusbitti, 8 databittä, 0 vastaavuusbittiä sekä 1 lopetusbitti ja siirtonopeus on 115200 bittiä sekunnissa. Tämä merkitään yleisesti: 115200,N,8,1.



Kuva 4: UART datapakkaus, 115200,N,8,1

Hyötynä UARTin käytöllä on esimerkiksi, että johtoja on vain kaksi eikä kellosignaaleja tarvitse käyttää. Lisäksi vastaavuusbitillä voidaan tarkistaa data virheiden varalta. UART on myös yleisesti käytetty ja helppokäyttöinen datansiirtoväline. Haitaksi voidaan katsoa pieni datakehys, joka on maksimissaan 9 bittiä. Lisäksi siirtonopeus UARTien välillä on oltava lähes sama. Maksimissaan 10% eroavaisuus sallitaan. [27]

## 4. Testauslaitteisto

### 4.1 LabView

Yksi oleellisimmista osista koko testausalustan luomisessa on LabView-ohjelma, sillä itse testauskoodi on tehty LabView-ohjelmalla. LabView'n voi asentaa koneelle osoitteesta [2], ja asennus vaatii rekisteröitymisen National Instruments -sivustolle. Kyseiseltä sivustolta ladataan myös ajureita niille testauslaitteille, jotka niitä vaativat.

LabView-ohjelma (lyhennys sanoista *Laboratory Virtual Engineering Workbench*) on virtuaalinen ohjelmointiympäristö, mikä tarkoittaa, että ohjelmointi tapahtuu graafisten notaatioiden avulla. Perinteisen tekstin sijaan käytetään erilaisia graafisia symboleita. Nämä ovat kytkettynä toisiinsa johdoilla, joiden avulla data kulkee. Kyseinen ohjelmointitapa on huomattavasti yksinkertaisempi ja nopeampi toteuttaa, jos verrataan esimerkiksi C-ohjelmointikieleen. LabView-ohjelmaa kutsutaan VI:ksi (*Virtual Instrument*, eli virtuaalinen työkalu), sillä se usein simuloi todellista työkalua. [3]

LabView-ohjelma koostuu kolmesta pääosasta:

**Etupaneeli** (*Front Panel*) – Tämä on näkymä, joka simuloi VI:n etupaneelia ja toimii käyttöliittymänä. Etupaneeliin voidaan lisätä esimerkiksi: painettavia nappeja, graafeja, kenttiä, johon käyttäjä syöttää tietoa, ohjelman ulostuloa, sekä paljon muuta.

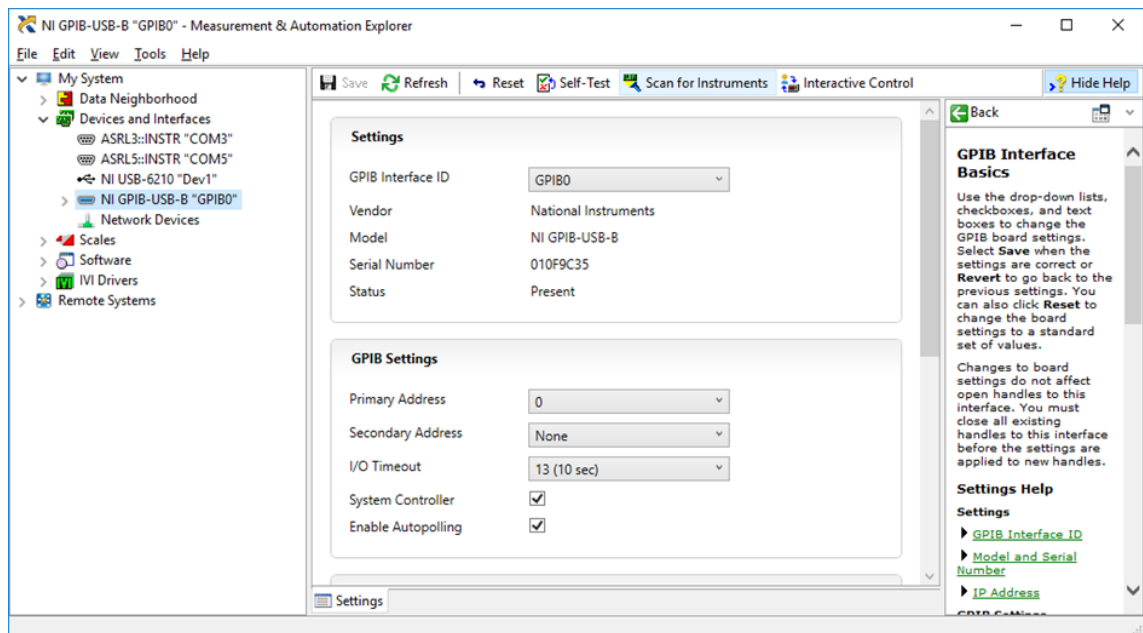
**Lohkokaavio** (*Block Diagram*) – Lohkokaavio on VI:n lähdekoodi. Tämä koodi koostuu alemman tason VI-kuvakkeista (*subVI*), vakioista, sisäänrakennetuista funktioista, sekä perusohjelmointitoiminnoista kuten *while*- ja *for*-silmukoita. Lohkokaaviossa kuvakkeet yhdistetään johdoilla, joilla datavirta merkitään. Kaikilla etupaneelin olioilla on vastaava terminaali lohkokaaviossa. Tämän avulla tieto kulkee käyttäjältä ohjelmalle ja toisin päin.

**VI-kuvake** (*VI Icon*) – VI-kuvake esittää toista VI:tä ohjelmassa ja vastaa aliohjelmaa, perinteisissä ohjelmointikielissä. Niitä käytetään kuten aliohjelmia syöttämällä tarvittavat tiedot ja kytkemällä ne sitten koodiin.

#### 4.1.1 National Instruments VISA

Eri laitteiden hallitsemiseen LabView'n avulla tarvitaan lisäksi National Instruments VISA. VISA (*The Virtual Instrument Software Architecture*) on standardi sille, miten ulkopuoliset laitteet, jotka ovat liitettynä esimerkiksi GPIB- (General Purpose Interface Bus) tai USB-kaapeleilla, konfiguroidaan ja ohjelmoidaan. NI VISA on National Instrumentsin versio VISASTA. Kun NI VISAN lataa koneelle [4] mukana tulee NI MAX-ohjelma (*Measurement & Automation Explorer*).

NI MAX on ohjelma, jonka avulla konfiguroidaan tietokoneeseen liitettävät laitteet, jotta niitä voidaan LabView'n avulla ohjata.



Kuva 5: NI MAX -ohjelman näkymä

Kuva 5 on NI MAX -ohjelman yleisnäkymä, joka aukeaa, kun ohjelman avaa. Vasemmasta reunasta löytyy *Devices and Interfaces*, jonka alta näkee koneeseen liitetyt laitteet. Painamalla *Scan for Instruments* -painiketta ohjelma etsii uudet laitteet, jotka on liitetty koneeseen. Kun NI MAX -ohjelma on laitteen löytänyt, voi laitetta käyttää LabView-koodissa olettaen, että tarvittavat VI:t ovat koneessa.

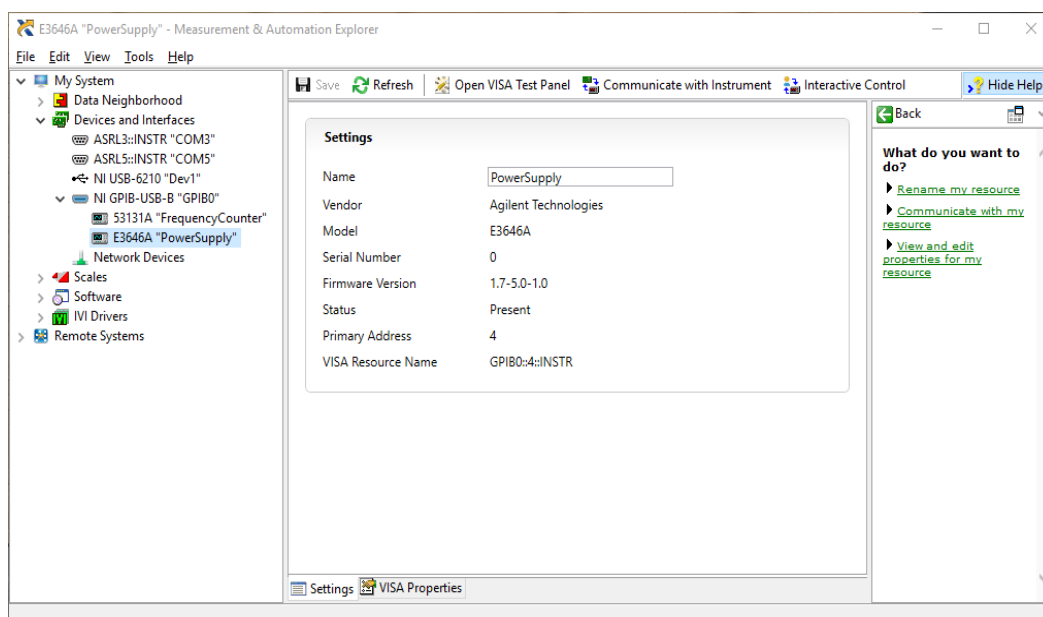


## 4.2 Teholähde

Teholähteenä käytetään Agilent Technologies E3646A Dual Output DC Power Supply -mallista laitetta. Tämä tehrolähde on valittu, koska testialustalle tarvitaan kaksi eri jännitettä, toinen jännite testialustalle ja toinen simuloimaan akkua. Teholähde voidaan lisäksi kytkeä tietokoneeseen GPIB-USB-kaapelin avulla ja ohjata suoraan LabView-ohjelman avulla, mikä yksinkertaistaa testausta. Tämä tehrolähde on myös yleisesti käytetty tehrolähde, joten kyseistä mallia on helppo tilata lisää, jos sille on tarvetta. Suurin syy miksi juuri tämä tehrolähde on käytössä on kuitenkin se, että tämän laitteen ja muiden mittalaitteiden saatavuus on hyvä ja niitä käytetään laajalti testauslaitteympäristöissä. Koska se täytti testialustan kriteerit, sen käyttäminen testialustassa oli helppo valinta.

Jotta tehrolähdettä voidaan ohjata LabView-ohjelman avulla, on tietokoneelle asennettava tarvittava ajuri. Ajuri kyseiselle tehrolähteelle on ladattavissa osoitteesta [5]. Ajurin latauskansiossa on myös mukana muutama esimerkki siitä, miten tehrolähdettä ohjataan LabView'n avulla, sekä kaikki tarvittavat LabView VI:t. Teholähde on kytkettynä tietokoneeseen IEEE-488- (eli GPIB) ja GPIB-USB-kaapelin avulla. Jos tehrolähde on kytkettynä tietokoneeseen oikein, NI MAX -ohjelma näyttää vastaavalta kuin kuvassa 6. Tehrolähteelle voi halutessa antaa oman nimen. Tässä tapauksessa sille on annettu nimi "PowerSupply". Mikäli nimeä ei anna, LabView-näkymässä näkyy ainoastaan laitteen "VISA Resource name". Tämä voi aiheuttaa sekaannusta, jos käytössä on monta laitetta eri GPIB-osoitteilla. Kuvasta 6 näkee, että tässä työssä tehrolähteen VISA-nimi on "GPIB0::4::INSTR" ja GPIB-osoite on 4. GPIB-osoitteen voi halutessa myös vaihtaa, mutta tässä käytetään oletusosoitteita.

Kun NI MAX -ohjelma löytää laitteen ja oikea ajuri on asennettuna, kannattaa tehrolähteen ohjausta LabView'n avulla kokeilla esimerkiohjelmilla. Esimerkkiohjelmista saa hyvän käsityksen siitä, miten laitetta hallitaan LabView'n avulla.



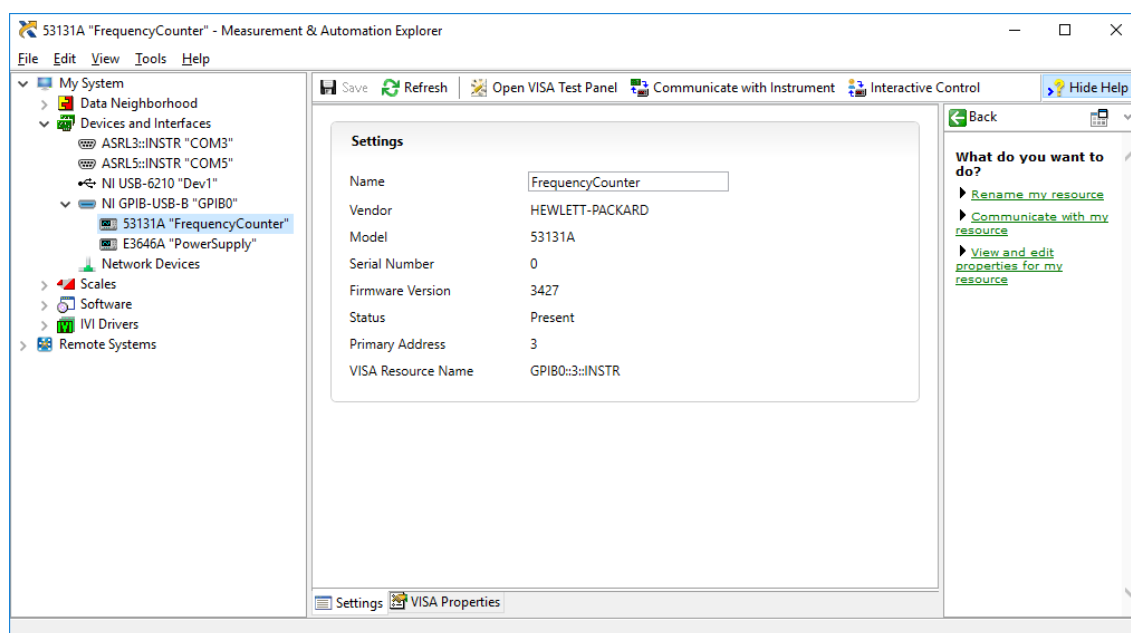
Kuva 6: NI MAX ikkuna, Teholähde kytkettynä

## 4.3 Taajuuslaskin

Testausta varten tarvitaan taajuuslaskin, joka pystyy mittaamaan kahta eri taajuutta. Näistä taajuuksista lisää DSP-kortin testauksen yhteydessä. Käytössä on Hewlett-Packardin 53131A Universal Counter -taajuuslaskin. Tärkeimpiin kriteereihin taajuuslaskimen valinnassa kuului sen ohjattavuus LabView-ohjelman avulla. GPIB-kaapelin avulla taajuuslaskin voidaan kytkeä rinnakkain teholähteen kanssa. 53131A-malli on helppokäyttöinen ja niitä on myös paljon markkinoilla, joten samanlaisten laitteiden hankinta on yksinkertaista.

Myös taajuuslaskimen käyttöä varten on asennettava ajuri. Ajuri löytyy vastaavasti National Instrumentsin sivuilta. [6] Ajurin latauskansiossa on mukana, niin kuin tehollähteellekin, esimerkkiohjelmia taajuuslaskimen käyttöä varten sekä LabView VI:t. Nämä ovat hyödyllisiä, jotta saa käsityksen siitä, miten laitetta ohjataan LabView'n avulla.

Taajuuslaskin yhdistetään tehollähteeseen GPIB-kaapelin avulla. Oikein kytkettynä ja ajurit asennettuna NI MAX -ikkuna näyttää vastaavalta kuin kuvassa 7.



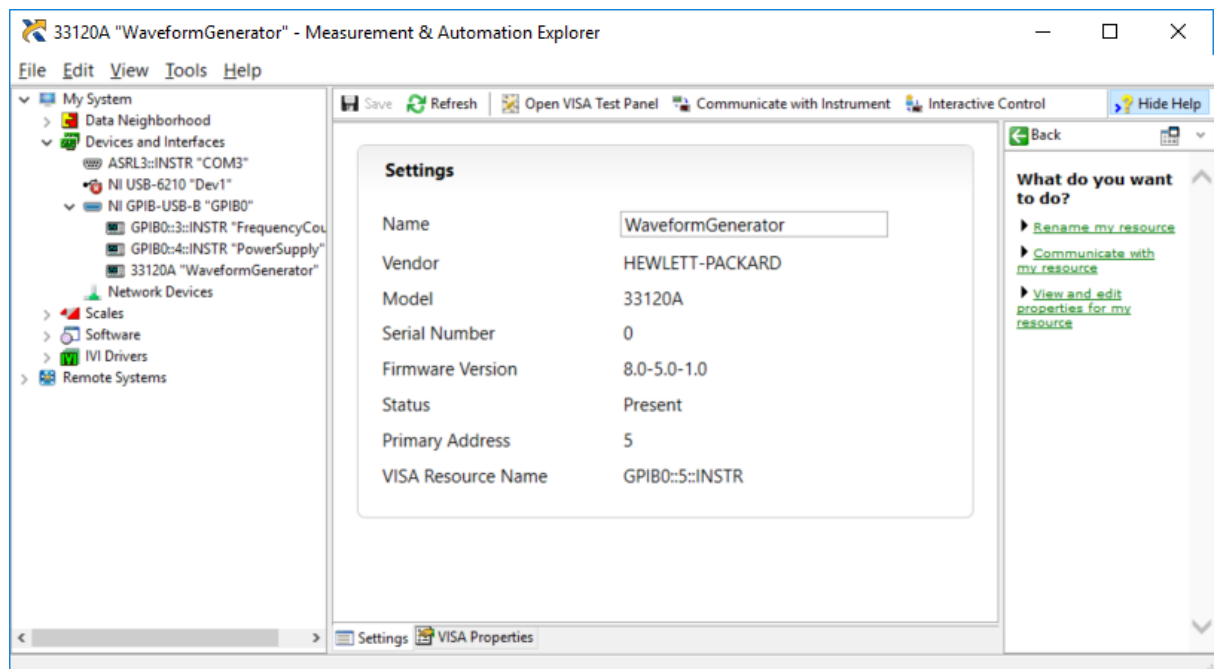
Kuva 7: NI MAX -ikkuna, taajuuslaskin ja tehollähde kytkettynä

Kuvasta 7 näkee, että myös taajuuslaskimelle on annettu käyttöä helpottava nimi "FrequencyCounter". Oletus-GPIB-osoite taajuuslaskimelle on 3 ja VISA-nimi "GPIB0::3::INSTR".

## 4.4 Signaaligeneraattori

Testisignaalin luomiseksi käytetään Hewlett-Packardin, 33120A Arbitrary Waveform Generator -mallista laitetta. Signaaligeneraattoria on helppo käyttää ja se on ohjattavissa LabView'n avulla, mikä oli tärkeää signaaligeneraattorin valinnassa. GPIB-kaapelin avulla kytkentä oli tietysti myös ehdoton valintakriteeri, jotta kaikkia laitteita voitaisiin ohjata samalla tavalla.

Ohjaukseen LabView'n avulla tarvitaan jälleen ajuri [7]. Samalla tavalla kuin sekä tehölähde että taajuuslaskinta ohjataan LabView'n avulla, on myös signaaligeneraattori kytkettävä tietokoneeseen GPIB-kaapelin avulla.



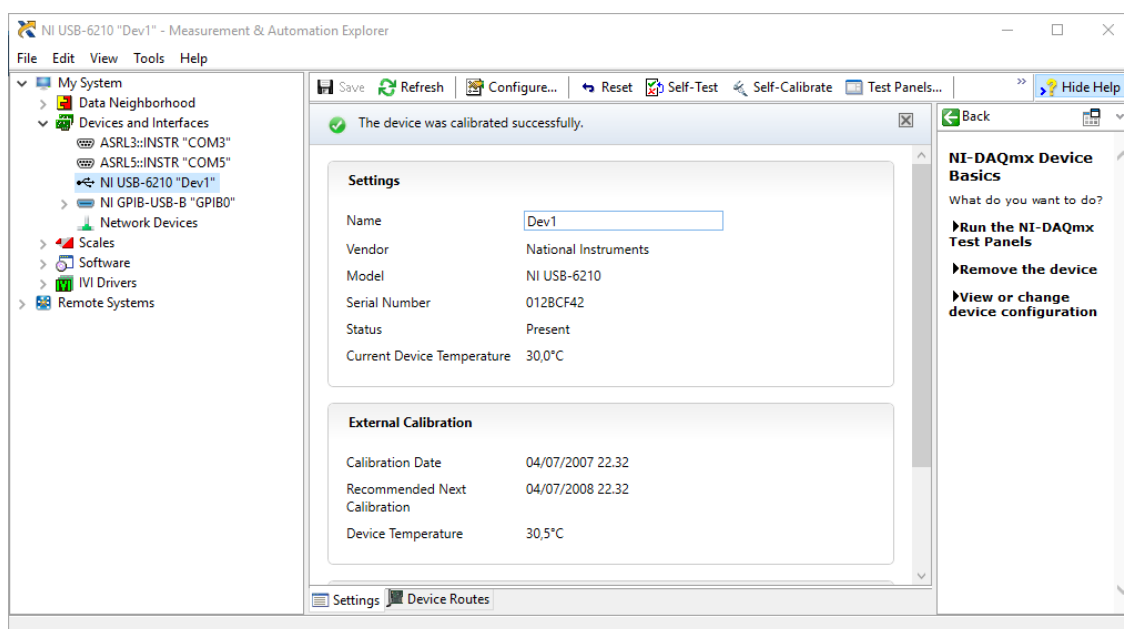
Kuva 8: NI MAX -ikkuna taajuuslaskin, tehölähde sekä signaaligeneraattori kytkettynä

Ajurit asennettuna sekä oikein kytkettynä GPIB-kaapelin avulla, NI MAX -ohjelman ikkuna näyttää niin kuin kuvassa 8. Signaaligeneraattorille on myös annettu oma nimi "WaveformGenerator" ja laitteen GPIB-osoite on 3.

## 4.5 National Instruments USB-6210

USB-6210 on monitoiminen sisään-/ulostulo DAQ-laite (Data Acquisition, eli datankeräys). Laitteessa on käytettävissä 16 analogista sisääntuloa, 4 digitaalista sisääntuloa ja 4 digitaalista ulostuloa. DAQ-laite kytketään koneeseen USB-kaapelin avulla. Työn testialustaan valittiin kyseinen DAQ-laite sen takia, että siinä oli 16 analogista sisääntuloa ja lisäksi, koska se oli National Instrumentsin valmistama. Näin ollen hyvä yhteensopivuus LabView'n kanssa oli tiedossa. Kun testialustaa ruvettiin suunnittelemaan, ei vielä tarkkaan tiedetty, montako mittauspistettä DAQ-laitteelle tarvittaisiin, joten myös tämän takia valittiin laite, jossa oli enemmän mittauspisteitä.

Ennen kuin laitteen saa näkyviin NI MAX -ohjelmassa, on tietokoneelle asennettava NI DAQmx -ajuri. [8] Asennuksen valmistuttua tulee DAQ-laite näkyviin NI MAX -ohjelmassa, kuten kuvassa 9.



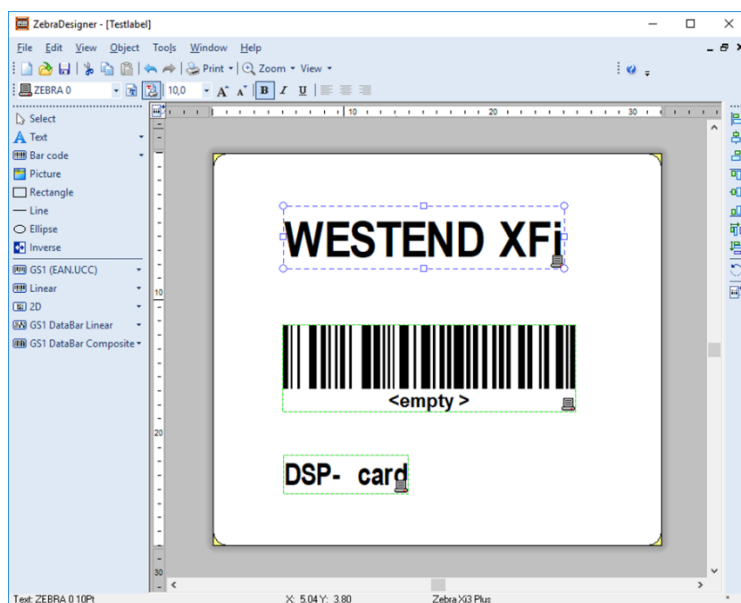
Kuva 9: NI MAX -näkyvä DAQ-laite kytkettynä

Koska käytössä on vain yksi DAQ-laite, sitä ei ole nimetty uudelleen, vaan oletusnimi "Dev1" on käytössä.

## 4.6 Tulostin

Testatut kortit on jollain tavalla merkittävä, jotta ne eivät mene sekaisin testaamatta olevien kanssa. Tähän tarkoitukseen on käytössä Zebra 110 XiIII Plus -tarratulostin. Myös tarratulostus on integroituna suoraan LabView-testauskoodiin. Tarratulostimen ohjaus LabView'n avulla on jokseenkin hankalaa, sillä LabView:ssä ei suoraan ole Zebra-tulostimelle sopivaa VI:tä vaan tulostimelle on lähetettävä tulostuskomennot tekstimuodossa.

Ennen kuin Zebra-tulostinta voidaan käyttää, on koneelle asennettava Zebra Setup Utilities -ohjelma. [9] Kun ohjelma on asennettu koneelle, voidaan sen avulla lisätä tarratulostin. Tarvittava ajuri ladataan myös automaattisesti koneelle konfiguroinnin yhteydessä. Tulostimen voi yhdistää tietokoneeseen esimerkiksi USB-, rinnakkaisportti- tai sarjaporttikaapelilla. Tässä tapauksessa se on kytkettynä USB-kaapelin avulla. Jos tulostimen yhdistäminen on onnistunut, tulee se myös näkyviin Windows-ohjauspaneeliin, tulostimien alle. Tulostinasennuksen yhteydessä Zebra Setup Utilities -ohjelma antaa myös vaihtoehdon ladata koneelle Zebra Designer -ohjelma. Tämän ohjelman avulla voidaan suunnitella tulostettava tarra. Tarra, jota käytetään DSP-korteissa, on esitetty kuvassa 10.

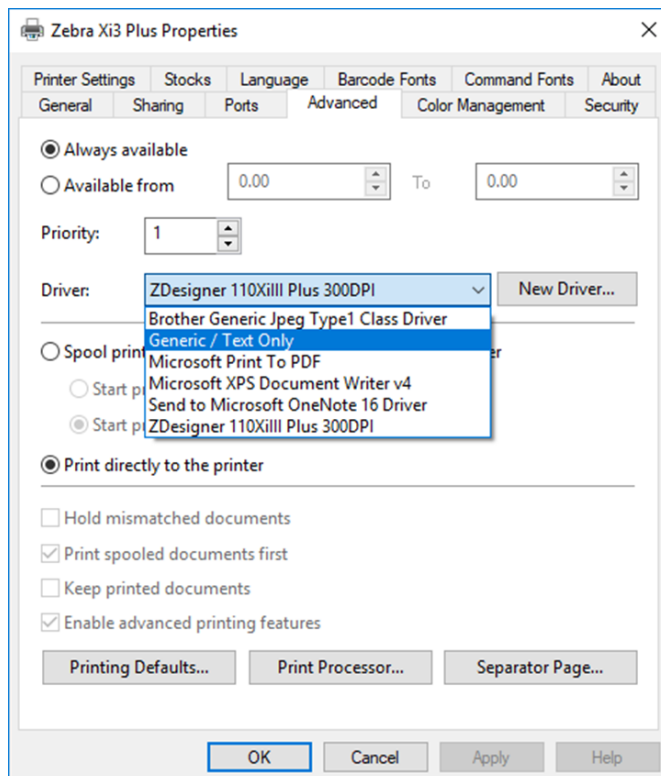


Kuva 10: DSP-kortin tarra hyväksytyin testin jälkeen

Yllä olevassa kuvassa tekstirivi "<empty>" ja viivakoodi korvataan kortin sarjanumerolla. Sama numero on myös tietokannassa. Jos sen sijaan kortti ei läpäise testiä, alimmalle riville tulee teksti "DSP- card FAIL".

Jotta tulostus saadaan integroitua testauskoodiin ja tulostus tapahtuisi LabView'n avulla, on muutamaa tulostinasetusta muutettava. Ensin on varmistettava, että tulostettava tarra on halutun näköinen, sillä Zebra Designer -ohjelmaa ei voida käyttää sen jälkeen, kun tulostinasetuksia on muutettu. Asetukset voi palauttaa takaisin, jos tulostusta haluaa muokata Designer-ohjelmalla. Kun mieleiseen tarraukonäköön on päästy, tulee se tulostaa tiedostomuotoon (Designer ohjelmassa: Print -> Print to file).

Tämä luo tekstitiedoston, joka sisältää Zebra-tulostuskielikomennot, joita tarvitaan myöhemmässä vaiheessa. Tämän jälkeen voidaan muokata tulostimen asetuksia menemällä tietokoneen ohjauspaneeliin ja valitsemalla tulostimen asetukset. (Control Panel -> All Control Panel Items -> Devices and Printers -> valitsemalla printer properties tarratulostimen kohdalla) Kuvan 11 näköinen ikkuna aukeaa ja siirtymällä osioon "Advanced", voidaan tulostimen ajuri vaihtaa -> Generic / Text only. Tämä on tehtävä, jotta LabView voi lähettää tulostettavan tarran ominaisuudet tekstimuodossa. Miten se käytännössä tehdään, käydään läpi myöhemmin LabView-testauskoodien yhteydessä.



Kuva 11: Zebra-tulostimen ajuriasetukset

## 5. PSU-kortin testaus

### 5.1 Testattavat elementit

PSU-kortilla on yhteensä 12 asiaa, joiden toimivuutta on tarkasteltava. Kaikki testattavat asiat ovat seuraavalla sivulla olevassa taulukossa 1. Kortilla on kolme nappia, joiden fyysinen toimivuus on tarkistettava: Esiasetus-, Yö-tila-, sekä Virta-nappi. Napit ovat ainoat asiat, joita LabView-ohjelma ei pysty itse testaamaan, vaan tähän tarvitaan testaajan manuaalinen painallus. Kaikki muut elementit LabView-ohjelma käy itse läpi. Näistä ensimmäiset ovat Bluetooth-moduulin toimivuus sekä audiokoodekki-lisenssi (aptx). BT-moduulin verifiointi tapahtuu heti, kun testialustaan kytketään virta päälle. Jos moduuli toimii normaalisti, PSU-testikoodi lähettää LabView'lle komennon: BT: PASS. Jos taas moduuli ei kytkeydy päälle, komento on: BT: FAIL. Moduulin aptX-lisenssi tarkistetaan samaan aikaan ja mikäli sellainen on moduulilla, LabView saa komennon: LICENCE PASS.

Seuraavat testattavat osiot ovat vasen ja oikea kanava, hakkurit sekä akun jännite. Näitä kaikkia LabView testaa NI USB-6210 -laitteen avulla. Miten se käytännössä tehdään, käydään läpi osiossa 5.3. Sekä vasen että oikea kanava on kokeiltava yksinkertaisesta syystä: tuleeko haluttu signaali ulos? Hakkureiden toiminnan tulisi olla sellainen, että ne muuttavat jännitteen 4V->20V sekä 20V->5V. Viimeisenä asiana, jonka NI USB-6210 mittaa, on akun jännite kortilla, eli näkyykö sisään tuleva 4V myös täällä.

PSU-korttia testattaessa käytetään 16V sekä 4V jännitteitä. 16V jännite on vain sitä varten, että nähdään, kulkeeko PSU-kortilla virta sisääntulossa. 4V taas simuloi akkua, joka on tässä testialustassa tehrolähteenä. Agilent E3646A -teholähde pystyy itse mittaamaan, mikä virta näkyy sisääntuloissa. Testiolosuhteissa 16V jännitteellä tulisi näkyä 5-10mA ja 4V jännitteellä noin 800mA.

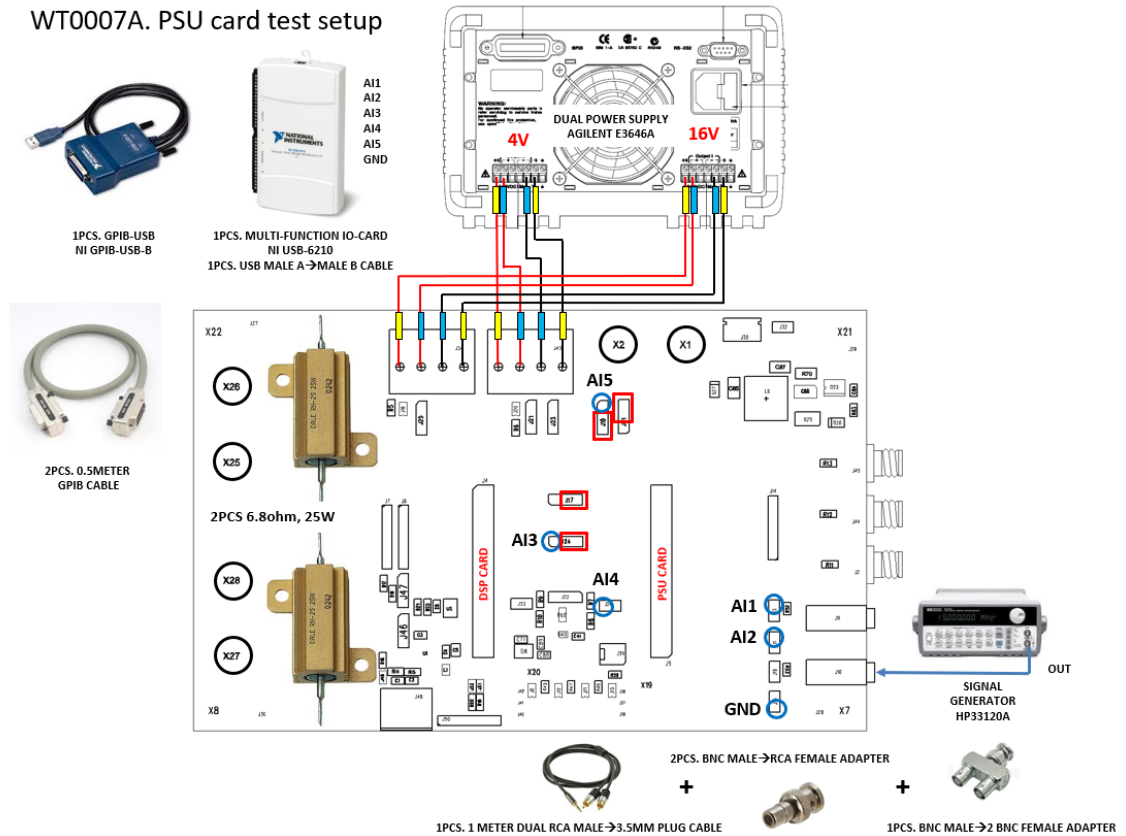
Taulukko 1: PSU- kortin testattavat elementit sekä selitteet

Testattava	Selite/odotusarvo
Esiasetus – nappi ”Preset”	Esiasetusnapin toimivuus
Yö-tila – nappi ”Nightmode”	Yö-tila-napin toimivuus
Virta – nappi ”Shutdown”	Virtanapin toimivuus
Lisenssi	Tarkistus että BT-moduulissa on tarvittava APTX-lisenssi (audiokoodekin kompressio- algoritmi)
BT-moduuli	BT-moduulin toimivuus, reagoiko moduuli komentoihin
Vasen kanava	Tuleeko vasemmasta kanavasta haluttu signaali ulos
Oikea kanava	Tuleeko oikeasta kanavasta haluttu signaali ulos
Virta 16V	Näkykö 16V jännitteellä odotettu virta, testialustassa 5-10 mA
Virta 4V	Näkykö 4V jännitteellä odotettu virta, testialustassa 700-900 mA
Hakkurin toimivuus, 5V	Pystyykö hakkuri muuttamaan jännitteen 20V -> 5V
Hakkurin toimivuus, 20V	Pystyykö hakkuri muuntamaan 4V -> 20V
Akun kytkentä	Näkykö sisään tulevan akun jännite myös kortilla. 3,8-4,2V



## 5.2 Testausalusta PSU-kortille

Testialustana käytetään samaa pohjalevyä sekä PSU-kortin testauksessa että DSP-kortin testauksessa. Erona on ainoastaan muutaman oikosulkupalan lisääminen/poistaminen. Kokonaisuus on helpoiten ymmärrettävissä kuvan 12 avulla. Tässä ei kuitenkaan esitetä tarkkoja komponenttien tietoja, sillä ne ovat yrityksen omaisuutta.



Kuva 12: PSU-kortin testialusta sekä tarvittavat laitteet

PSU-kortin testausta varten tarvitaan:

- Agilent E3646A -teholähde + johdot
- NI USB-6210 DAQ-laite + johdot
- HP 33120A Signaaligeneraattori + kaapelit yhdistämiseen
- GPIB-USB kaapeli/muunnin
- 2 x GPIB-kaapelia
- Tietokone, jolla on LabView-ohjelma
- USB-kaapeli LabView'n ja testialustan väliseen kommunikaatioon

Teholähde on kytkettynä testialustaan kuvan 12 osoittamalla tavalla. Teholähteessä on aistintoiminto "Sense", jonka avulla teholähde pystyy mittaamaan todellisen jännitteen johdon toisessa päässä [11]. Tämän avulla voidaan minimoida mahdolliset johdoista aiheutuvat jännitehäviöt. Teholähde on kytkettynä tietokoneeseen (osion 2.2 osoittamalla tavalla) GPIB-USB-kaapelin avulla ja teholähdettä ohjataan LabView-

testikoodissa. Signaaligeneraattori on niin ikään kytkettynä GPIB-kaapelin avulla ja arvot annetaan LabView-koodissa. Testeissä käytetään 1kHz, 500mVpp suorakaide-signaalia. Signaali lähetetään testialustan sisääntuloon (kuvassa 12 oikeassa alanurkassa), josta se kulkeutuu testattavaan korttiin.

DAQ-laite on kytkettynä testialustaan irrotettavilla johdoilla. Pinnit, johon DAQ-laite liitetään, on merkitty sinisillä ympyröillä kuvassa 12. Laitteessa on vastaavat sisääntulot kuin kuvassa on esitetty. AI1 ja AI2 ovat oikean sekä vasemman kanavan mittauspisteet, AI3 on 5V jännitteen mittauspiste, AI4 mittaa 10V jännitteen, AI5 akun jännitettä ja GND on maadoitettu pinni. Testialustan punaiset neliömerkinnät ovat oikosulkupaloja, joiden tulee olla kytkettynä PSU-korttia testattaessa.

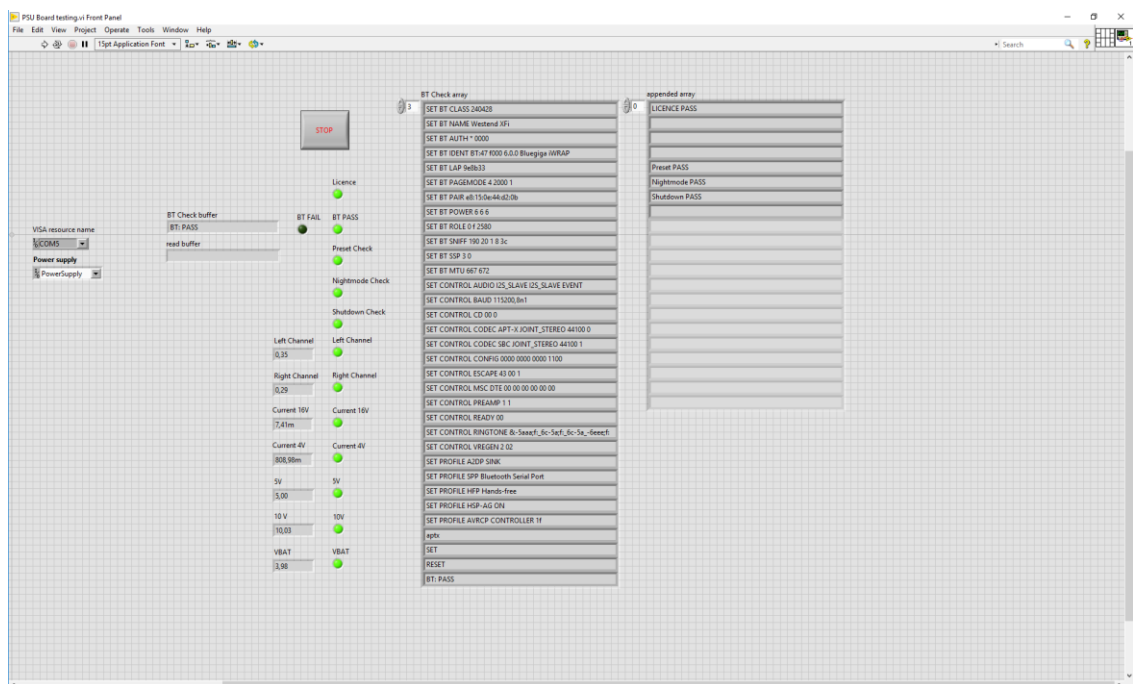
Kun kaikki laitteet on yhdistetty oikein, testialustaan liitetään vielä toimivaksi todettu DSP-kortti. Tälle kortille on ladattu PSU-korttia varten käytettävä testikoodi. Tätä korttia ei tarvitse tämän jälkeen poistaa alustasta. Se poistetaan alustasta ainoastaan siinä tapauksessa, että PSU-testikoodiin tehdään jokin muutos ja se on ladattava uudestaan DSP-kortille.

## 5.3 LabView-ohjelma

LabView-ohjelmassa on kaksi osiota. Ensimmäinen niistä on etupaneeli, joka näkyy PSU-kortin testaajalle. Toinen on itse LabView-koodi, johon testaajan ei tarvitse koskea. PSU-kortille on kaksi lähes identtistä LabView-ohjelmaa. Ainoa ero niissä on, että lisääkö koodi automaattisesti testatun kortin tietokantaan sekä tulostaa sille tarran, vai käykö ohjelma vain läpi korttitestin.

Ensimmäisen kerran, kun uutta korttia testataan, käytetään ohjelmaa, joka myös lisää kortin tietokantaan sekä tulostaa sille tarran. Mikäli testatuissa korteissa ilmenee jokin virhe ja virhe on yritetty korjata, käytetään toista ohjelmaa ilman lisäämistä tietokantaan. Tämä sen takia, että kortilla on jo oma sarjanumero tietokannassa. Jos korjattu kortti läpäisee testin, voidaan sille tulostaa uusi tarra.

### 5.3.1 Etupaneeli



Kuva 13: Etupaneelinäkymä, kun PSU-kortti on läpäissyt testin

LabView-ohjelma käynnistetään aina siten, että testaaja painaa vasemmassa ylänurkassa olevaa nuolta (kuva 13). Testikoodi tarkistaa ensin BT-moduulin toimivuuden. Jos moduuli toimii oikein, LabView lukee koko BT-komentosarjan sekä lopuksi BT: PASS komennon ja sytyttää BT PASS valon etupaneelissa. Mikäli BT-moduuli ei toimi, PSU-testikoodi lähettää komennon BT: FAIL LabView'lle, sekä sytyttää BT FAIL valon etupaneelissa. BT-komentosarjan voi myös visuaalisesti nähdä kuvassa 13, BT Check -taulukosta. Tätä taulukkoa ei varsinaisesti tarvita testauksessa, vaan se on lisätty etupaneeliin, jotta testaaja voisi vielä visuaalisesti verifioida moduulin toimivuuden.

BT-moduulitestin jälkeen LabView testaa muut elementit. Lisenssin ollessa voimassa PSU-testikoodi lähettää LabView'lle komennon LICENCE PASS ja sytyttää Licence-valon. Tämä komento sekä nappien komennot näkyvät oikeanpuolisessa taulukossa. Jälleen kerran tällä taulukolla ei ole muuta funktiota kuin olla visuaalisena tarkastuksena testaajalle. Nappien komennot tulevat taulukkoon, kun testaaja painaa nappeja olettaen, että napit toimivat. Nappien valot pysyvät päällä ohjelman loppuun saakka, jos ne kerran ovat syttyneet.

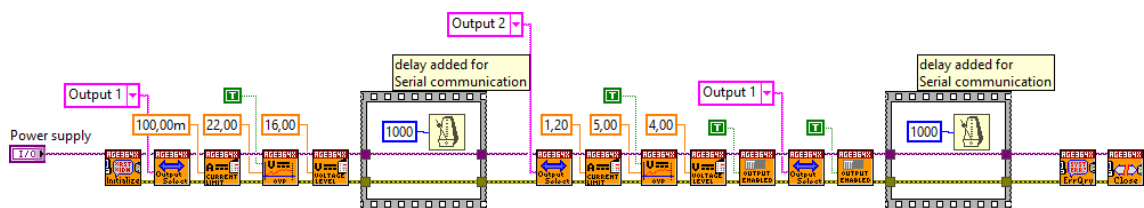
Jännite 16V ja Jännite 4V -valot syttyvät, jos teholähde näkee odotetun virran. 16V jännitteellä tulisi näkyä 5-10mA virta ja vastaavasti 4V jännitteellä noin 800mA virta. Etupaneelissa on lisäksi valojen vieressä ruutu, josta kyseinen arvo on luettavissa.

Oikea ja vasen kanava, 5V, 10V sekä VBAT -valot syttyvät, jos DAQ-laite mittaa oikeat arvot. Tämän työn testiolosuhteissa ne ovat: 0,25-0,4 molemmille kanaville, 4,8-5,2V 5V jännitteelle, 3,8-4,2V VBAT-arvolle sekä 9,5-10,5V 10V jännitteelle. 10V jännite on todellisuudessa 20V, mutta se on testialustassa jaettava, koska DAQ-laite pystyy mittaamaan korkeintaan 12V jännitteitä. DAQ-laitteen sekä teholähteen mittaustulokset päivittyvät jatkuvasti koodin pyöriessä.

Testikoodi pyörii, kunnes kaikki valot ovat syttyneet tai testaaja painaa etupaneelilla olevaa stop-nappia. Jos näin ei olisi, hidas testaaja saattaisi myöhästyä nappien painalluksista ja tulokseksi tulisi hyläty. Testaajan on siis itse lopetettava ohjelma, jos hän huomaa, että jokin valoista ei syty.

### 5.3.2 Lohkokaavio

Lohkokaavio on tässä jaettu osiin, koska yhtenä isona kokonaisuutena sitä ei voi liittää kuvamuodossa työhön. Kaikki osiot ovat varsinaisessa testikoodissa yhdistettynä johdoilla, kuten LabView-ohjelmilla on tapana. Näin saadaan myös testit suoritettua oikeaan aikaan. LabView-ohjelma alkaa aina palauttamalla oletusasetukset ohjelmalle. Käytännössä tämä tarkoittaa edellisen testin valojen sammuttamista ja mittaustulosten nollaamista. Tämän jälkeen teholähde kytketään päälle halutuilla arvoilla, kuten kuvassa 14.



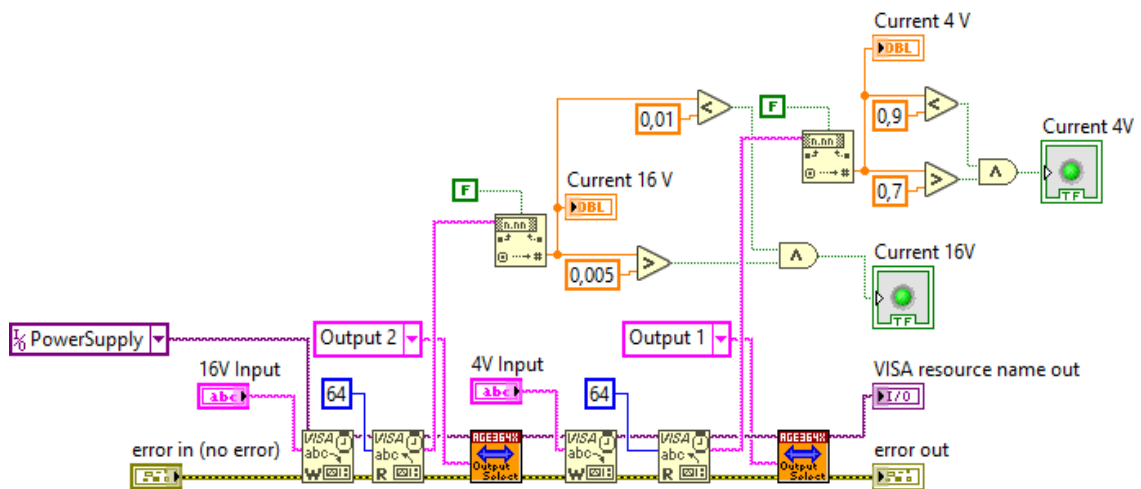
Kuva 14: Teholähteen käynnistäminen PSU testausta varten

Tässä asetetaan ensin ulostulo 1 jännitteeksi 16V, virralle yläraja 0,1A sekä jännitteen yläraja 22V. Raja-arvot ovat ainoastaan oikosulkutilanteita varten. Kun arvot on asetettu ulostulolle 1 tehdään sama toimenpide toiselle ulostulolle. Vastaavasti tälle ulostulolle



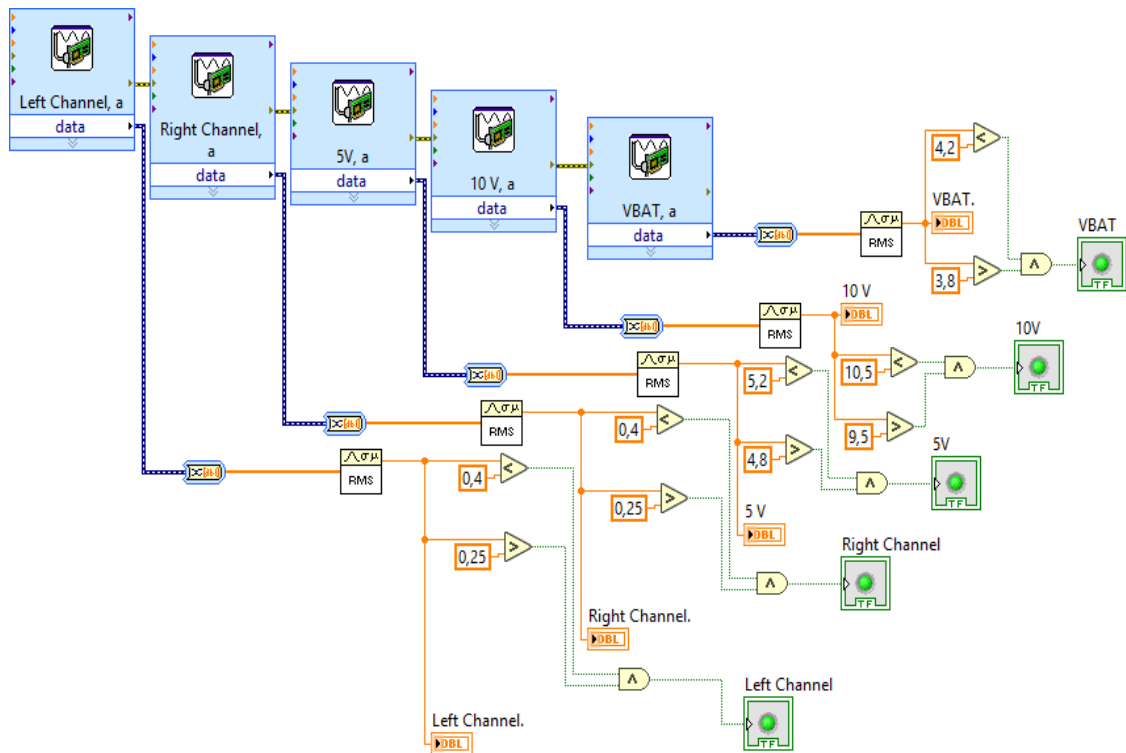
While-silmukalla on kolme tapaa, joilla se sulkeutuu ja ohjelma jatkaa seuraaviin testeihin. Nämä ovat joko BT: PASS tai BT: FAIL komentojen saapuminen tai aikarajan täytyminen. Aikaraja on asetettu tässä testissä kahdeksaksi sekunniksi.

Riippumatta siitä, millä tavalla BT-moduulin testisilmukasta on päästy pois, testikoodi jatkaa seuraavaan while-silmukkaan. Tässä silmukassa käydään läpi loput testattavat elementit yhtäaikaaisesti. Tämä while-silmukka on tässä jaettuna osiin, jotta siitä saisi selvää. Kuvassa 17 nähdään, miten tehollähteen avulla saadaan mitattua virrat. Niin kauan, kun 16V ulostulolla näkyy 5-10mA virta, Current 16V -valo palaa. Vastaavasti jos 4V ulostulolla virran arvo on 700mA ja 900mA välillä, Current 4V -valo palaa. Virtojen raja-arvot on saatu testaamalla muutama toimiva PSU-kortti. Virtojen arvot asettuvat suurin piirtein keskelle raja-arvoja. Sen sijaan, jos kortissa on jokin vika, arvot poikkeavat huomattavasti näistä arvoista, eivätkä kortit näin ollen läpäise testiä.



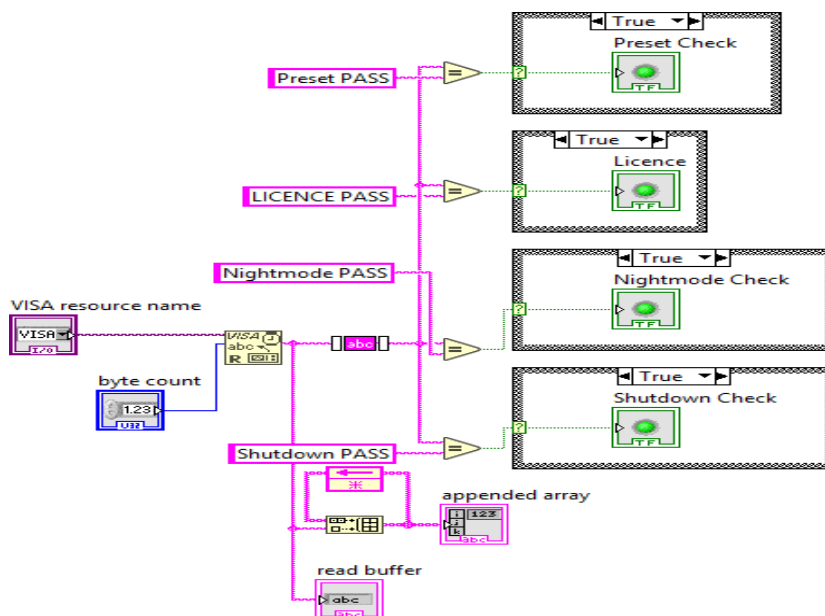
Kuva 17: Menetelmä, jolla tehollähteen ulostuloilla näkyvät virrat saadaan mitattua

DAQ-laitteen mittaukset tehdään seuraavalla tavalla (kuva 18). DAQ-laite mittaa järjestyksessä vasemman kanavan, oikean kanavan, 5V, 10V, sekä VBAT arvot ja vertaa niitä raja-arvoihin. Jos mittaustulos pysyy raja-arvojen sisällä, vastaava merkkivalo palaa. DAQ-mittaukset on tehtävä vuoron perään, sillä laite ei kykene samanaikaisesti suorittamaan useita mittauksia.



Kuva 18: DAQ-laitteen mittauksia varten tarvittava LabView-koodi

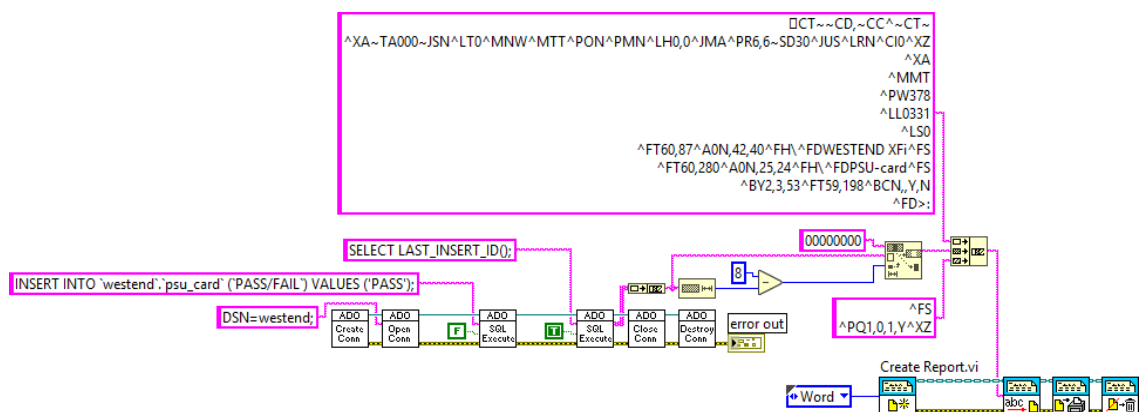
Viimeiset elementit, jotka tämä while-silmukka tarkistaa, ovat lisenssin voimassaolo sekä nappien toimivuudet, kuva 19. Tässä toimii sama logiikka kuin BT-moduulin testisilmukassa. VISA lukee komennot, lisää ne taulukkoon havainnollistamiseksi sekä vertaa tekstirivin neljään haluttuun tekstiriviin (Preset PASS, LICENCE PASS, Nightmode PASS sekä Shutdown PASS). Jos jokin tapauskehikoista on tosi, syttyy vastaava valo. Muissa tapauksessa epätoisi tapaus toteutuu ja jälleen kerran se on tyhjä, sillä valon on pysyttävä päällä, jos se on kerran syttynyt.



Kuva 19: Ohjelmakoodi, jolla napit sekä lisenssi tarkistetaan

While-silmukka pyörii, kunnes jompikumpi kahdesta tapauksesta toteutuu: kaikki valot ovat syttyneenä samanaikaisesti (kaikki testatut asiat toimivat niin kuin pitää) tai testaaja painaa etupaneelissa olevaa Stop-nappulaa (yksi tai useampi asia ei kortilla toimi).

Toisen while-silmukan jälkeen testi on valmis ja jäljellä on ainoastaan kortin lisääminen tietokantaan sekä tarran tulostaminen. Se tapahtuu tässä LabView-ohjelmassa seuraavanlaisesti. (Kuva 20) Yritys käyttää MariaDB-tietokantaa ja kuvan VI:t ovat sopivia tähän tarkoitukseen. LabView-ohjelmalle on myös olemassa tietokantojen käsittelyä varten ladattava lisäosa [10], mutta tässä työssä sille ei ole tarvetta.

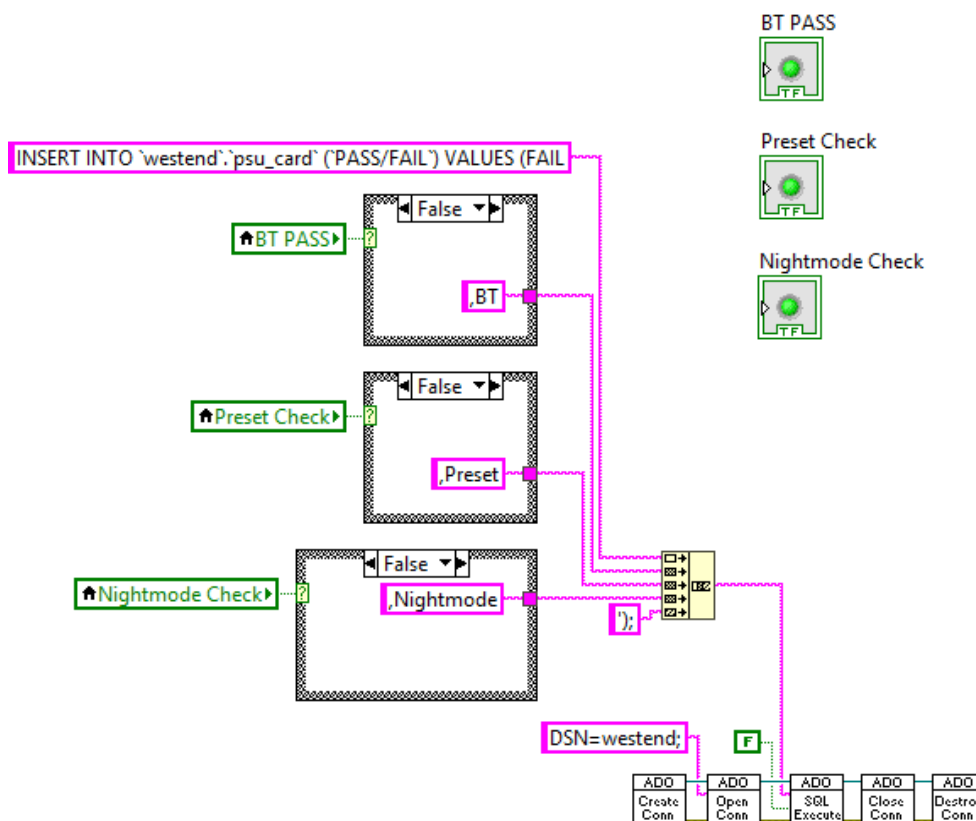


Kuva 20: Hyväksytyn kortin lisääminen tietokantaan sekä tarran tulostus

Ensin on muodostettava yhteys haluttuun tietokantaan. Tässä tapauksessa tietokannan nimi on "westend". Kun "Open Conn" VI:tä käytetään ensimmäistä kertaa, se pyytää salasanaa kyseiseen tietokantaan. SQL Execute VI:lle annetaan tämän jälkeen komento, jolla uusi kortti saadaan lisättyä tietokantaan. Komento, jolla lisätään uusi merkintä tietokantaan, riippuu täysin siitä, miten tietokanta on rakennettu. Tietokannan käsittelyyn ei tässä työssä kuitenkaan perehdytä.

LabView-ohjelmassa on kaksi tapausta, joissa kortit lisätään tietokantaan. Ensimmäinen tapaus on, että kaikkien osa-alueiden valot palavat. Kuvassa 20 on esitettyä komento ("`INSERT INTO 'westend'.psu_card'(PASS/FAIL) VALUES ('PASS');`"), jolla saadaan lisättyä uusi hyväksytty kortti tietokantaan. SQL Execute VI:tä käytetään uudestaan, jotta saadaan juuri lisätyn kortin korttinumero tulostettua tarralle. Mikäli kortti ei ole läpäissyt testiä ja yksi tai useampi valo ei pala testisilmukan jälkeen, käytetään kuvan 21 mukaista koodia.





Kuva 21: LabView-ohjelma kun yksi tai useampi valo ei pala testauksen jälkeen (tässä esitettyä vain 3 valoa)

Tässä käytetään samaa komentoriviä, mutta PASS-komennon sijaan halutaan lisätä FAIL sekä kaikki hylätyt elementit. Se toimii niin, että jokaisen valon kohdalla ohjelma tarkistaa, palaako valo vai ei. Jos valo palaa, tapaus on True ja sen kohdalle ei lisätä tekstiä. Sen sijaan, jos valo ei pala, tapaus on False, ja komentotekstiin lisätään haluttu virheteksti. Kuvassa 21 on esitettyä yksinkertaistettu versio kyseisestä koodipätkästä. Tässä on kolme valoa: BT-moduulin testivalo, Preset-napin testivalo sekä Nightmode-napin testivalo. Mikäli esimerkiksi BT-moduulin valo palaa mutta kumpikaan napeista ei toimi, komento näyttää tältä: "INSERT INTO 'westend'.psu\_card' ('PASS/FAIL') VALUES (FAIL,Preset,Nightmode');". Näin ollen tarraan tulostetaan "PSU-card FAIL" ja tietokannasta voi helposti nähdä, mitä virheitä kortilla oli.

Kun kortti on lisätty tietokantaan, on enää tarran tulostus jäljellä. Kuvan 20 pitkä merkkijono on Zebra-tulostinkieltä. Kuten osiossa 4.6 kerrotaan, se saadaan Zebra Designer -ohjelman avulla. Tekstipätkä on jaettu vielä osiin, jotta saadaan tulostettua tarralle oikea korttinumero (viivakoodina ja numerona). Korttinumero luetaan tietokannasta komennolla SELECT LAST\_INSERT\_ID();. Numeron eteen lisätään vielä nollia, koska halutaan oikean pituinen numerosarja (tässä tapauksessa kahdeksan numeroa).

Tarratulostuksen jälkeen testaus on valmis. Lopussa kytketään vielä pois virrat lähes samalla koodipätkällä, jolla ne kytkettiin päälle (kuva 14). Ainona erona on, että viimeiset kaksi vihreää True-kuvaketta on vaihdettu False-kuvakkeiksi.

## 6. DSP-kortin testaus

### 6.1 Testattavat elementit

DSP-kortin testauksessa käytetään samoja menetelmiä kuin PSU-kortin testauksessa. Erona on, että ennen kuin uutta korttia voidaan testata, on sille ladattava DSP-testikoodi. PSU-kortin testauksessa tämä ei ollut tarpeellista, sillä testialustaan on jo kytkettynä toimiva DSP-kortti oikealla PSU-testikoodilla.

DSP-kortilla on huomattavasti enemmän testattavaa verrattuna PSU-korttiin. Tällä kortilla on yhteensä 24 asiaa, jotka on tarkistettava. Nämä näkyvät taulukossa 2 sivulla 40. Näistä osa on samoja kuin PSU-kortilla, sillä molempien korttien toimivuus vaaditaan, jotta kyseinen elementti läpäisisi testin. Myös DSP-kortilla on 3 nappia, joita testaajan on itse painettava: Äänenvoimakkuus ylös/alas -napit sekä Äänetön-nappi. LabView-ohjelma käy läpi itsenäisesti kaikki muut testit. Samalla tavalla kuin PSU-kortin testauksessa LabView käy ensin läpi BT-moduulin kommunikaation. DSP-testikoodi lähettää joko BT: PASS -komennon, jos moduuli toimii tai BT: FAIL -komennon, jos moduuli ei toimi. DSP-korttia testattaessa voi myös ilmetä sellainen virhe, että kumpakaan komentoa ei tule. Tämä viittaa silloin siihen, että DSP-testikoodi ei pyöri kortilla, mikä taas johtaa lähes kaikkien testien hylkäykseen.

BT-moduulin testauksen jälkeen LabView-ohjelma käy läpi vasemman ja oikean kanavan toimivuudet, 4V jännitteen sekä 20V jännitteen. Näitä mittauksia varten LabView käyttää NI USB-6210 DAQ -laitetta. DAQ-laite pystyy mittaamaan korkeintaan 10V jännitteitä, joten 20V jännite on testialustalla puolitettu. Viimeiset mittaukset, jotka ovat samanlaisia kuin PSU-kortin testauksessa ovat jännitteillä, 20V sekä 4V näkyvät virrat. Virrat mitataan jälleen Agilent E3646A -teholähteen avulla. Työn testiarvoilla tulisi 20V jännitteellä näkyä noin 100mA virta ja vastaavasti 4V jännitteellä noin 145mA virta.

DSP-kortilla on oma sisäinen mittausten menetelmä eri jännitteillä. Nämä ovat VDD5V (5V), VDDP (20V) sekä VBAT (4V). DSP-testikoodi mittaa jännitteet ja lähettää vastaavat komennot LabView-ohjelmalle, jos arvot ovat oikein (VDD5V PASS, VDDP PASS, ja VBAT PASS). Sisääntulo- sekä ulostulo-tarkastukset ovat sitä varten, että todetaan, havaitseeko DSP-kortti molempien johtojen kytkemisen vai ei. Johdot ovat testialustalla, joten mikäli DSP-testikoodi rekisteröi ne, lähettää se LabView'lle komennot LINE IN PASS sekä LINE OUT PASS.

Seuraavat 4 kohtaa tarkistuslistalla ovat: BT ON/OFF, MCU PRESET, MCU ON/OFF sekä DCJACK CONN. Näissä on vain testattava, että signaali kulkee DSP-kortilta testialustalle. Ne ovat kytkettynä testialustalla "loopback"-menetelmällä. Tämä tarkoittaa sitä, että ne ovat kytkettynä toiseen signaaliin, jota DSP-koodi vaihtaa. Signaalit ovat ohjelman käynnistyksessä "0" ja koodin pyöriessä ne vaihtuvat tilaan "1". Jos signaalit ovat kytkettynä toisiinsa, tarkistettavat kohdat saavat myös uuden arvon. Nämä signaalit

DSP-testikoodi tarkistaa ja mikäli ne täsmäävät, koodi lähettää komennot LabView'lle (BT ON/OFF PASS, MCU PRESET PASS; MCU ON/OFF PASS ja DCJAC PAAS).

Taajuusmittaukset käydään läpi kahteen kertaan LabView-ohjelman aikana. Ensimmäisen kerran heti BT-testauksen jälkeen, jolloin taajuuslaskin mittaa taajuudet 11,28 MHz (Systeemikellotaajuus) ja 44,1 kHz (Näytteenottotaajuus). Tämän jälkeen testikoodi vaihtaa toisiin asetuksiin, jotta taajuudet voidaan mitata uudestaan laajan testisilmukan jälkeen. Tällä kertaa taajuuksien tulisi olla 12,28 MHz ja 48 kHz. Kahden eri taajuuden välillä on vaihdettava, sillä jotkut puhelimet käyttävät 48 kHz näytteenottotaajuutta ja jotkut 44,1 kHz näytteenottotaajuutta.

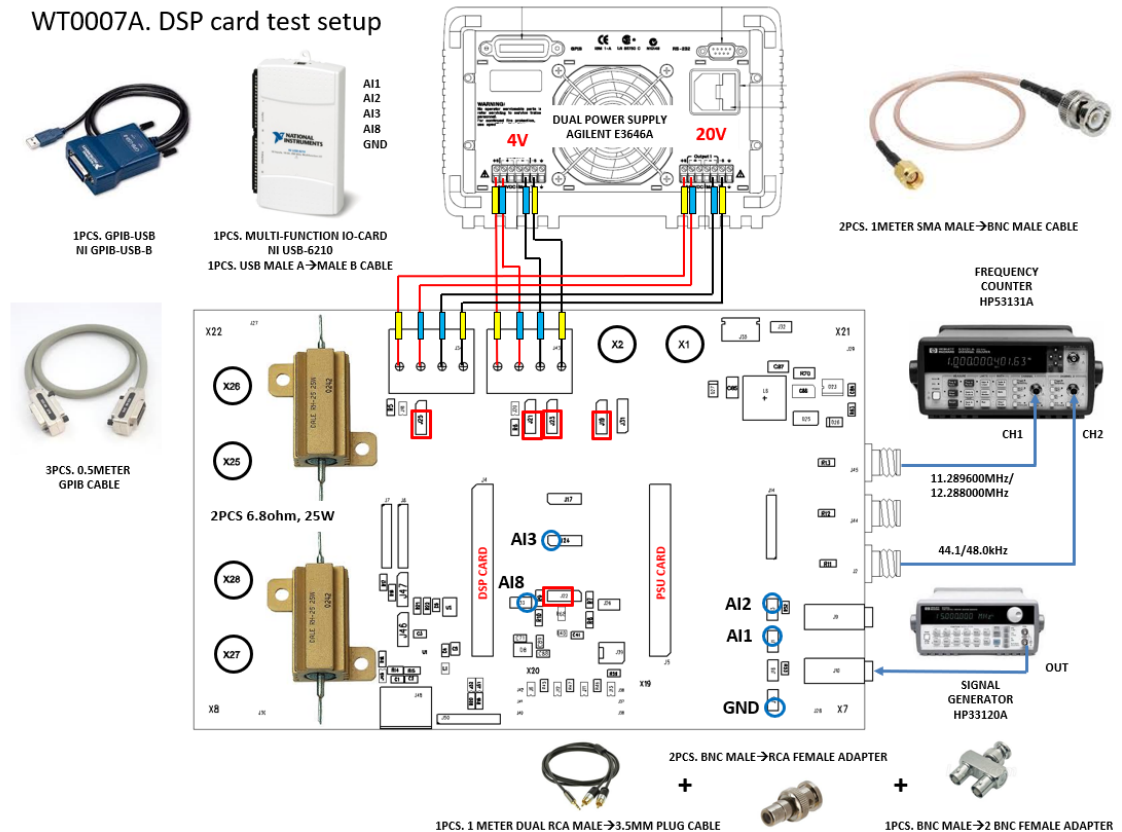
Viimeisenä tarkistetaan vielä DSP-komponentti. Tällä komponentilla on kolme mahdollista virhettä: ylikuumeneminen, alijännite tai oikosulku. Komponentilla on sisäänrakennettu testaussysteemi, joka lähettää DSP-testikoodille vikailmoituksen ja vastaavasti testikoodi lähettää LabView-ohjelmalle tätä virhettä vastaavan komentorivin.

Taulukko 2: DSP- kortin testattavat elementit sekä selitteet

Testattava	Selite/odotusarvo
BT-moduuli	Toimiiko DSP-kortin sekä BT-moduulin kommunikaatio
"Volume up" -nappi	Äänenvoimakkuus ylös -napin toimivuus
"Mute" -nappi	Äänetön-napin toimivuus
"Volume down" -nappi	Äänenvoimakkuus alas -napin toimivuus
Vasen kanava	Tuleeko vasemmasta kanavasta haluttu signaali ulos
Oikea kanava	Tuleeko oikeasta kanavasta haluttu signaali ulos
Jännite 4V	Näkykö sisään tuleva 4V jännite myös kortilla, 3,8-4,2V
Jännite 20V (10V)	Näkykö sisään tuleva jännite 20V myös kortilla, 9,5-10,5V
Virta 20V	Näkykö 20V jännitteellä odotettu virta, testialustassa 90-120 mA
Virta 4V	Näkykö 4V jännitteellä odotettu virta, testialustassa 135-155 mA
VDD5V	DSP-kortin laskema VDD5V arvo on oikea
VBAT	DSP-kortin laskema VBAT arvo on oikea
VDDP	DSP-kortin laskema VDDP arvo on oikea
LINE IN	Sisääntulo toimii
LINE OUT	Ulostulo toimii
BT ON/OFF	Onko BT on/off juotettuna
MCU PRESET	Onko MCU Preset juotettuna
MCU ON/OFF	Onko MCU on/off juotettuna
DCJACK CONN	Onko DCJACK juotettuna
11,28 MHz	Näkykö taajuus 11,28 MHz kortilla
44,1 kHz	Näkykö taajuus 44,1 kHz kortilla
12,28 MHz	Näkykö taajuus 12,28 MHz kortilla
48 kHz	Näkykö taajuus 48 kHz kortilla
DSP-komponentti	Onko komponentissa jokin kolmesta virheestä: oikosulku, liian korkea lämpötila, liian alhainen jännite

## 6.2 Testausalusta DSP-kortille

Testialustana toimii sama pohjalevy kuin PSU-kortilla. Kuten osiossa 5.2 kerrottiin, myös DSP-kortin testialustan tarkat komponentit ovat tässä jätetty merkitsemättä. Kuvan 22 avulla voidaan jälleen havainnollistaa, mihin kohtaan oikosulkupalat tulevat, mitä laitteita tarvitaan sekä miten ne kytketään.



Kuva 22: DSP-kortin testialusta sekä tarvittavat laitteet

DSP-kortin testausta varten tarvitaan:

- Agilent E3646A -teholähde + johdot
- NI USB-6210 DAQ -laite + johdot
- HP 33120A -signaaligeneraattori + kaapelit yhdistämiseen
- HP 53131A -taajuuslaskin + kaapelit
- GPIB-USB-kaapeli/muunnin
- 2 x GPIB-kaapelia
- Tietokone, jolla on LabView-ohjelma
- USB-kaapeli LabView'n ja testialustan väliseen kommunikaatioon

Teholähde kytketään testialustaan kuten kuvassa 22. Tässä käytetään laitteen "Sense"-ominaisuutta [11], jonka avulla saadaan minimoitua mahdolliset johdoista aiheutuvat jännitehäviöt, ja näin ollen tarkempi jännitteen arvo testialustalla. Teholähde kytketään tietokoneeseen GPIB-USB-kaapelin avulla, jotta sitä voidaan ohjata LabView-ohjelmalla.

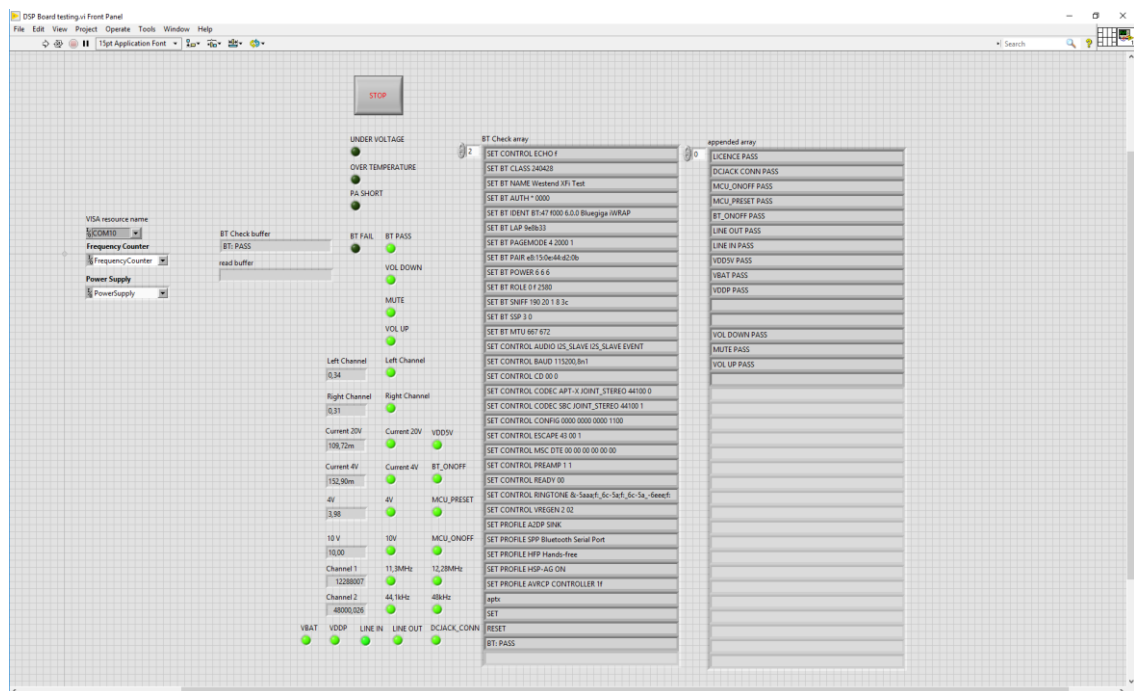
Signaaligeneraattori sekä taajuuslaskin ovat niin ikään kytkettynä GPIB-kaapelien avulla ja ohjattavissa LabView-ohjelmalla. Signaaligeneraattorille syötetään samat arvot kuin PSU-korttitestissä (1kHz, 500mVPP suorakaidesignaali) ja se kytketään testialustaan kuten kuvassa 22. Taajuuslaskimen molemmat kanavat ovat kytkettynä testialustaan, koska alustalta on mitattava kahta taajuutta samanaikaisesti.

DAQ-laitteella on tällä testialustalla neljä mittauspistettä + maa. Niiden sijainnit ovat merkittynä sinisillä ympyröillä kuvassa 22, ja vastaavat sisääntulot näkyvät DAQ-laitteessa. AI1 ja AI2 mittaavat vasemman ja oikean kanavan signaalia, AI3 mittaa 4V jännitettä ja AI8 10V jännitettä, GND on luonnollisesti kytkettynä maahan. DSP-korttia testattaessa on myös lisättävä viisi oikosulkupalaa, joiden paikat ovat merkittynä kuvassa 22 punaisilla neliöillä. Lopuksi asetetaan vielä toimivaksi todettu PSU-kortti testialustalle sille merkitylle paikalle.

## 6.3 LabView-ohjelma

DSP-kortin testauksella on sama periaate kuin PSU-kortilla: LabView-ohjelmia on kaksi ja ne ovat lähes identtiset. Näistä toinen on käytössä, kun uutta DSP-korttia testataan ja sille halutaan lisätä sarjanumero tietokantaan sekä tulostaa tarra. Toista käytetään, kun jo tietokannassa olevaa korttia testataan uudestaan. Erona näissä ohjelmissa on ainoastaan tietokantaan lisääminen sekä tarran tulostaminen.

### 6.3.1 Etupaneeli



Kuva 23: Etupaneelinäkymä, kun DSP-kortti on läpäissyt testin (UUSI KUVA!)

Testausohjelma käynnistetään painamalla kuvassa 23 vasemmassa ylänurkassa näkyvästä pienestä nuolisymbolista kuten muutkin LabView-ohjelmat. Samalla tavalla kuin PSU-kortin testauksessa BT-moduuli tarkistetaan ensimmäisenä. Jos moduuli toimii normaalisti, BT Check -taulukkoon tulee BT-komennot sekä BT: PASS. Vastaavasti taulukkoon tulee BT: FAIL, mikäli se ei toimi, ja vastaava merkkivalo syttyy. Tässä testissä on myös mahdollista saada kokonaan tyhjä taulukko. Jos näin tapahtuu, DSP-testikoodi ei ollenkaan pyöri kortilla ja DSP-komponentti voidaan todeta virheelliseksi. Tässä tapauksessa lähes kaikki testattavat asiat hylätään automaattisesti, sillä LabView'lle ei tule komentoja lainkaan.

Kun BT-moduuli on testattu, ohjelma siirtyy mittaamaan taajuuudet 11,28 MHz sekä 44,1 kHz, sytyttää niiden valot etupaneelista ja siirtyy eteenpäin testissä. Tämä johtuu siitä, että LabView-ohjelmassa on noin 2 sekunnin viive, kun vaihdetaan kanavien välillä. Jos

mittaus tehtäisiin joka while-silmukassa, yhden kortin testaukseen menisi vähintään minuutti. Kaikki muut testit, jotka on esitetty taulukossa 23, käydään läpi samanaikaisesti paitsi toisten taajuuksien mittaukset. Nämä taajuusmittaukset suoritetaan ohjelman lopussa. Ohjelma käy läpi kaikki kohdat ja sytyttää vastaavan valon etupaneelista, jos testi on hyväksytty. Testaajan on jälleen fyysisesti painettava äänenvoimakkuus- sekä äänetön-nappeja, jotta niitä voidaan testata.

Mikäli kaikki testit ovat hyväksytyjä, ohjelma siirtyy viimeiseksi mittaamaan kaksi jäljellä olevaa taajuutta. Jos testaaja huomaa, että jokin elementti ei mene läpi, on hänen painettava stop-painiketta etupaneelista, jotta testiohjelma päättyisi. Lopuksi ohjelma kirjaa kortin tietokantaan ja tulostaa joko hyväksytyn tai hylätyn tarran.

### 6.3.2 Lohkokaavio

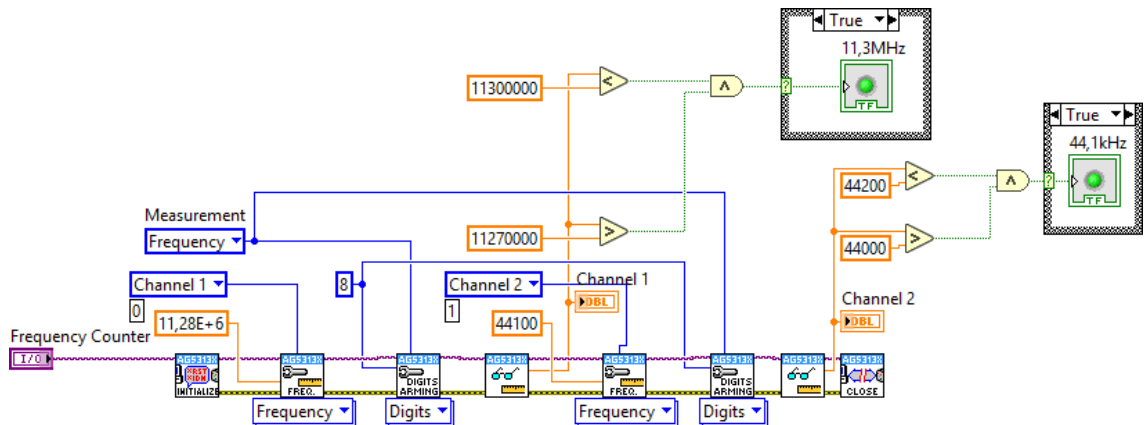
Kuten PSU-kortin lohkokaavio osiossa 5.3.2, myös DSP-kortin lohkokaavio on jaettuna osiin, jotta siitä saisi kuvien muodossa selvää. Osiot ovat linkitettyinä toisiinsa johdoilla, jotta testit suoritettaisiin oikeaan aikaan. Molempien testien lohkokaavioissa on paljon samanlaisia rakenteita, joten osion 5.3.2 kuviin viitataan myös tässä lohkokaaviossa.

LabView-ohjelma alkaa palauttamalla ohjelman oletusarvot entiselleen (sammuttamalla kaikki valot sekä tyhjentämällä taulukot), ja tämän jälkeen käynnistämällä teholähde kuten kuvassa 14. Erona kuvaan 14 on ainoastaan jännitteen arvo ulostulolla 1, joka tässä tapauksessa tulisi olla 20V. Jännitteiden ylärajat voidaan pitää samoina, mutta virtojen yläraja voidaan molemmilla ulostuloilla asettaa 0,2A suuruisiksi.

Kun virrat on kytketty päälle, testaus alkaa. Ensimmäisenä on jälleen BT-moduulin testaus. Tämä suoritetaan täsmälleen samalla tavalla kuten PSU-kortille kuvassa 16. DSP-korttia testattaessa while-silmukka päättyy, kun yksi kolmesta skenaariosta toteutuu; BT: PASS tai BT: FAIL -komennot luetaan tai 8 sekuntia on umpeutunut. PSU-korttia testattaessa tämä kolmas vaihtoehto ei käytännössä koskaan toteudu, sillä se viittaa vain siihen, että testikoodi olisi jumiutunut, mikä taas johtuu DSP-komponentin vajaatoiminnasta.

BT-testin jälkeen ohjelma siirtyy mittaamaan systeemikellotaajuuden sekä näytteenottotaajuuden. Tämä suoritetaan kuvan 24 osoittamalla tavalla. Taajuuslaskin kytketään päälle, jäsille valitaan haluttu kanava sekä annetaan mittauksen odotettu arvo (11,28 MHz). Sitten valitaan mitä mitataan (tässä tapauksessa taajuutta) ja sen jälkeen mittari mittaa näkyvän taajuuden. Jos taajuus on sallittujen rajojen sisällä, 11,3 MHz:n merkkivalo syttyy. Tämän jälkeen sama tehdään toiselle kanavalle, joka mittaa 44,1 kHz:n taajuutta ja sytyttää vastaavan valon, mikäli taajuus on oikea.

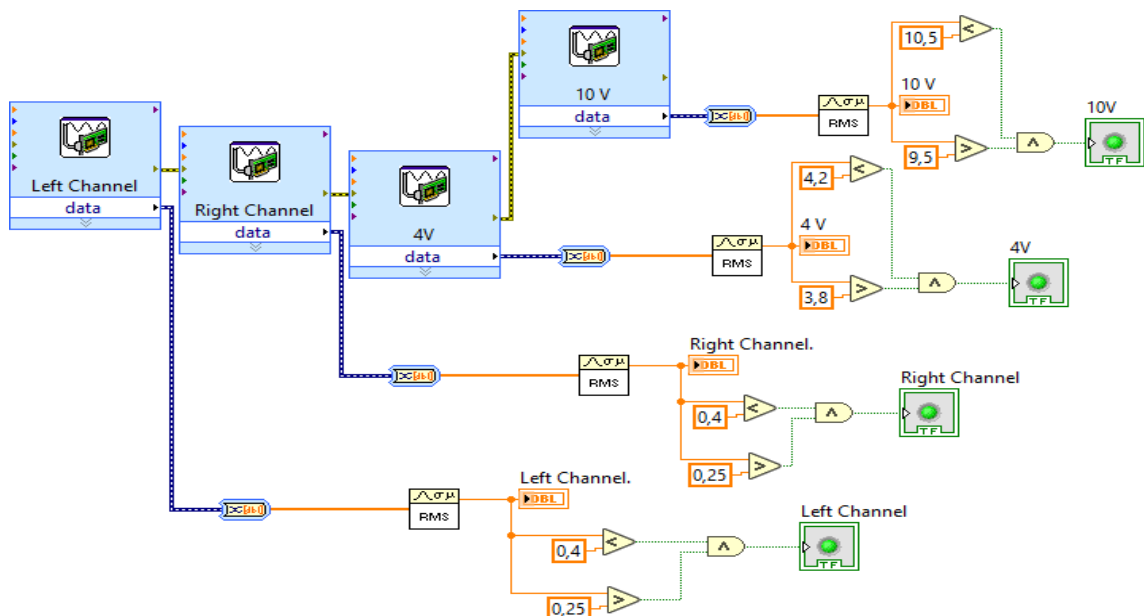




Kuva 24: Taajuusmittaus HP53131A laitteen avulla LabView-ohjelmalla

Kun taajuusmittaukset on suoritettu, siirrytään jälleen isoon while-silmukkaan. Tässä silmukassa käydään läpi kaikki testit lähes yhtäaikaaisesti, ja kuten PSU-kortin lohkokaaviossa, myös tämä while-silmukka on jaettuna pienempiin osiin. Ensimmäisenä mitataan teholähteen ulostuloilla näkyvät virrat. Mittaukset suoritetaan samalla tavalla kuin kuvassa 17, mutta arvot ovat vai erilaiset. DSP-kortille 20V jännitteellä tulisi näkyä 90-120mA virta, jotta merkkivalo palaisi. Vastaavasti 4V jännitteelle tulisi näkyä 135-155mA virta, jotta sen merkkivalo syttyisi.

DAQ-laitteen mittaukset suoritetaan kuten kuvassa 25. Tässä mitataan jälleen vasemman sekä oikean kanavan signaalit sekä 4V ja 10V jännitteet testialustalla. Mittaukset on suoritettava vuorotellen, sillä DAQ-laite ei pysty käsittelemään enempää kuin yhtä mittausta tasan samanaikaisesti. Jos mitattavat arvot pysyvät raja-arvojen välissä, vastaava merkkivalo palaa.



Kuva 25: DAQ-laitteen mittaukset LabView-ohjelmalla

Tässä while-testisilmukassa on jäljellä vielä komentorivien tarkastus. Toimintaperiaatteena on sama kuin PSU-kortin lohkokaaviossa kuvassa 19. DSP-kortilla on vain paljon enemmän mahdollisia tekstirivejä. Nämä kaikki komennot näkyvät osion

6.3.1 kuvassa 23, oikeanpuolimmaisessa taulukossa. Näistä kaikki paitsi VOL UP PASS-, VOL DOWN PASS- sekä MUTE PASS -komennot generoidaan suoraan DSP-testikoodissa. Nämä kolme muuta komentoa lähetetään LabView'lle ja ne ilmestyvät taulukkoon, kun testaaja on painanut kyseisiä nappeja DSP-kortilla ja ne toimivat. Jokaiseen tekstiriviin liittyy vastaava merkkivalo, joka syttyy heti kun rivi, on lähetetty LabView-ohjelmalle.

DSP-korttia testattaessa on vielä kolme DSP-komponentin sisäistä testiä, jotka komponentti suorittaa automaattisesti. Nämä ovat ylikuumeneminen, oikosulku sekä alijännite. Mikäli jokin näistä virheistä ilmenee, lähettää komponentti komennon DSP-testikoodille, joka vuorostaan lähettää LabView'lle komentorivin ja merkkivalo syttyy.

Kun kaikki testit ovat hyväksytyjä tai testaaja on päättänyt lopettaa testisilmukan, suoritetaan vielä viimeiset taajuusmittaukset. DSP-testikoodi on while-silmukan aikana vaihtanut taajuudet 48 kHz näytteenottotaajuudelle sekä 12,28 MHz systeemikello-taajuudelle. Jos vaihto on onnistunut, lukee mittari (vastaavasti kuten kuvassa 24 arvot 48 kHz sekä 12,28 MHz ja sytyttää viimeiset merkkivalot.

Tämän jälkeen lisätään vielä testattu kortti tietokantaan sekä tulostetaan sille tarra. Tietokantaan lisääminen sekä tarran tulostaminen tapahtuu samalla tavalla kuin osiossa 5.3.2 kuvissa 20 ja 21. Kortti lisätään tietysti omaan paikkaansa tietokannassa, tämän työn tapauksessa paikka on 'westend'. 'dsp\_card'.

## 7. Tulokset

Kun testialusta ja testikoodi on luotu, on enää jäljellä korttien testaus. Diplomityön tekohetkellä ensimmäiset 100 kappaletta kutakin piirilevyä oli jo tuotettu ja niiden testaaminen oli osittain kiireellistä, sillä prototyypit oli saatava ensimmäisille asiakkaille testiin. Tästä johtuen ensimmäiset 75 kappaletta on testattu ohjelmalla, joka ei vielä lisännyt niitä tietokantaan. Tietokanta luotiin vasta hieman myöhemmin, minkä takia alla olevassa kuvassa 26 näkyy ainoastaan 25 PSU-korttia.

PSU CARD NR	HW SCH	HW PCB	HW BOM	PASS/FAIL	TEST DATE
00000025	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-03-15 15:45:42
00000024	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	FAIL,BT,Current 16V,Current 4V,5V,10V,VBAT,LICENCE	2019-03-15 15:44:34
00000023	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-03-15 15:44:02
00000022	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-03-15 15:43:31
00000021	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-01-04 13:13:01
00000020	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial.xls	FAIL,BT,Preset,Nightmode, Shutdown,LC,RC,Current 4V...	2019-01-03 16:48:28
00000019	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial.xls	FAIL,Current 16V,Current 4V,10V	2019-01-03 16:19:01
00000018	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial.xls	PASS	2019-01-03 16:18:27
00000017	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial.xls	PASS	2019-01-03 16:18:01
00000016	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial.xls	PASS	2019-01-03 16:17:34
00000015	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial.xls	PASS	2019-01-03 16:17:06
00000014	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial.xls	PASS	2019-01-03 16:16:40
00000013	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial.xls	PASS	2019-01-03 16:16:14
00000012	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial.xls	FAIL,Current 4V	2019-01-03 16:15:36
00000011	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial.xls	PASS	2019-01-03 16:14:41
00000010	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial.xls	FAIL,BT,Preset,Nightmode, Shutdown,LC,RC,Current 4V...	2019-01-03 16:14:06
00000009	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial.xls	PASS	2019-01-03 16:13:30
00000008	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial.xls	PASS	2019-01-03 16:13:00
00000007	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial.xls	PASS	2019-01-03 15:45:22
00000006	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial.xls	PASS	2019-01-03 15:44:51
00000005	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial.xls	PASS	2019-01-03 15:44:23
00000004	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial.xls	PASS	2019-01-03 15:43:54
00000003	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial.xls	PASS	2019-01-03 15:43:23
00000002	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial.xls	PASS	2019-01-03 15:38:53
00000001	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial.xls	PASS	2019-01-03 15:38:09

Kuva 26: 25 testattua PSU-korttia tietokannassa

Tietokannassa olevista PSU-korteista näkee, että kahdessa tapauksessa (kortit 10 ja 20) ongelmana on ollut DSP-kortin sekä PSU-kortin välinen yhteys, sillä kaikki testattavat elementit ovat hylättyjä. Syy tähän on luultavasti juotosvirhe. Kolmella muulla hylätyllä kortilla hylkäyssyynä on luultavasti myös jokin juotosvirhe ja lisäksi kortilla 24 bluetooth-moduuli ei toimi.

DSP-kortteja on tietokannassa muutama enemmän, sillä alkuperäisen testauksen jälkeen niiden virheitä on saatu korjattua ja näin ollen kortit on pystytty testaamaan uudestaan sen jälkeen, kun tietokanta oli luotu. Kuvassa 27 näkyy kaikki 34 korttia, jotka tässä vaiheessa löytyvät tietokannasta.

DSP CARD NR	HW SCH	HW PCB	HW BOM	PASS/FAIL	TEST DATE
00000034	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-03-15 15:10:30
00000033	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	FAIL,Current 20v	2019-03-15 15:09:48
00000032	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-03-15 15:08:59
00000031	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-03-15 15:08:15
00000030	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	FAIL,Current 20v	2019-03-15 15:07:41
00000029	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-03-15 15:05:25
00000028	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-03-15 14:59:57
00000027	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-03-15 14:59:00
00000026	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-01-04 13:37:47
00000025	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-01-04 13:37:18
00000024	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-01-04 13:36:46
00000023	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-01-04 13:36:17
00000022	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-01-04 13:35:47
00000021	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-01-04 13:35:18
00000020	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-01-04 13:34:47
00000019	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-01-04 13:34:15
00000018	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-01-04 13:33:36
00000017	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-01-04 13:32:47
00000016	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	FAIL,Current 20v,UNDER VOLTAGE	2019-01-03 14:45:51
00000015	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	FAIL,Current 20v,OVER TEMPERATURE	2019-01-03 14:45:05
00000014	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-01-03 14:44:13
00000013	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-01-03 14:43:43
00000012	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-01-03 14:43:09
00000011	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-01-03 14:42:36
00000010	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-01-03 14:42:01
00000009	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-01-03 14:41:31
00000008	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-01-03 14:40:57
00000007	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-01-03 14:40:25
00000006	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-01-03 14:39:52
00000005	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	FAIL,Current 20v,UNDER VOLTAGE	2019-01-03 14:39:20
00000004	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	FAIL,BT,VOL DOWN,MUTE,VOL UP,LC,RC,Current 20v,C...	2019-01-03 14:38:16
00000003	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-01-03 14:37:30
00000002	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-01-03 14:36:42
00000001	WA0007E.SCH	WA0007E.PCB	WA0007E_BillofMaterial_new.xls	PASS	2019-01-03 14:35:49

Kuva 27: 34 testattua DSP-korttia tietokannassa

Korteilla 5, 15 ja 16 testi on näyttänyt DSP-komponentin sisäistä virhettä, joko alijännitettä tai liian korkeaa lämpötilaa. Tämä luultavasti johtuu virheestä itse DSP-komponentilla tai mahdollisesti juotosvirheestä kortilla. Kortilla 4 on niin ikään ollut virhe DSP-komponentilla, sillä siinä on kaikki elementit hylätty. Kaksi viimeistä virheellistä korttia (30 ja 33) olivat hieman sallittujen virta-arvojen ulkopuolella. Kortti 30 oli hieman alle ja kortti 33 hieman yli sallitun välin.

Kaikkia hylättyjä kortteja ei ole vielä onnistuttu korjaamaan, sillä syy esimerkiksi sille, miksi jännitteiden ulostuloilla näkyy joillakin korteilla sallitusta välistä poikkeava arvo, on vielä epäselvä. Positiivista on kuitenkin se, että testausalusta toimii ja virheelliset kortit on voitu siirtää sivuun korjausta varten.

## 8. Yhteenveto

Tässä diplomityössä käytiin ensin läpi piirilevyjen valmistusta sekä erilaisia käytössä olevia tarkastusmenetelmiä, joilla voidaan havaita mahdollisia virheitä piirilevyillä. Näitä menetelmiä ovat esimerkiksi ICT-testaus, missä piirilevy asetetaan neulapedin päälle. Neulat ovat kosketuksessa mittauspisteisiin, joiden avulla mitataan komponenttien toiminta. Tällä menetelmällä voidaan havaita esimerkiksi juotosvikoja, viallisia komponentteja tai vastuksien arvoja. Muita tarkastusmenetelmiä, joita työssä käydään läpi ovat AOI-, manuaalinen- sekä röntgentarkastus. Näistä manuaalinen tarkastus tehdään silmämääräisesti, mikäli piirilevyrakenne on suhteellisen yksinkertainen. Jos piirilevyrakenne on monimutkaisempi tai komponentit ovat pieniä, käytetään usein Automated Optical Inspection -menetelmää. Tämä menetelmä suorittaa tarkastuksen automaattisesti kameroiden avulla. Röntgentarkastus sen sijaan on käytössä, jos piirilevy on monikerroksinen. Viimeinen testausmenetelmä, joka käydään työssä läpi, on funktionaalinen testaus. Tässä testauksessa valmiit piirilevyt testataan niiden käyttöolosuhteissa. Testattavia ominaisuuksia ovat usein jännite- sekä virta-arvot, kommunikaatiot piirilevyjen välillä ja mahdollisten fyysisten kytkimien toiminta. Funktionaalisessa testauksessa laaditaan testialusta, johon yhdistetään testattava piirilevy kuten se lopullisessa tuotteessa yhdistettäisiin. Testialusta yhdistetään tietokoneeseen, joka suorittaa itse testauksen. Yleinen testauksissa käytettävä apuväline on LabView-ohjelma.

Tämän jälkeen työssä esiteltiin tuote jonka piirilevyille tässä työssä laaditaan funktionaalinen testausalusta. Laite on kannettava hifi-kaiutin, jonka tärkein ominaisuus on erinomainen äänenlaatu. Kaiuttimen piirilevyrakenne koostuu neljästä piirilevystä, joiden toiminta on testattava. Työssä luodaan testiympäristö kahdelle niistä, PSU-kortille sekä DSP-kortille. Kaksi muuta piirilevyä ovat antennikortti sekä I/O-kortti. Näiden rakenne on sen verran yksinkertainen, että manuaalinen tarkastus riittää.

Työn seuraavassa luvussa käytiin läpi testialustassa käytettävät laitteet. Näihin kuuluu LabView-ohjelma, jolla testiohjelma on luotu, Agilent E3646A-teholähde, Hewlett Packardin 53131A-taajuuslaskin, Hewlett Packardin 3312A-signaaligeneraattori, National Instrumentsin USB-6210-datakeräin sekä Zebra 110 XiIII Plus -tarratulostin. Tässä luvussa käydään myös läpi, miten kaikki laitteet saadaan kytkettyä tietokoneeseen ja laitteiden tarvittavat ajurit asennettua koneelle, jotta niitä voitaisiin ohjata LabView-ohjelman avulla.

Testialustan rakenne ja luominen esitettiin seuraavissa luvuissa. Alustoja on luotava kaksi, yksi PSU-kortille ja toinen DSP-kortille. Molempien korttien testialustat perustuvat samanlaiseen pohjalevyyn. Eroina ovat ainoastaan oikosulkupalojen paikat sekä DAQ-laitteen mittauspisteet. Lisäksi DSP-korttia testattaessa on alustaan kytkettävä myös taajuuslaskin. Näissä luvuissa laadittiin myös molemmille korteille omat LabView-ohjelmat. PSU-kortin testauskoodi on yksinkertaisempi kuin DSP-kortin testauskoodi, sillä PSU-kortilla on vähemmän testattavia elementtejä.

Työn viimeisessä osiossa nähtiin, minkälaisia testituloksia on tähän mennessä saatu. Testattuja PSU-kortteja löytyy tietokannasta 25 kappaletta ja DSP-kortteja 34

kappaletta. Tuloksista huomattiin, että testausalusta toimii ja virheelliset kortit löydettiin. Testialusta löytää virheelliset kortit ja lisää ne tietokantaan virheineen. Tämä on kätevää, sillä tietokannasta voidaan helposti nähdä, mitä virheitä korteilla on ollut ja myöhemmin virheet voidaan mahdollisesti korjata.

## Lähdeluettelo

- [1] Vuoluset. Kaiuttimien historian pääkohdat. 2019. [verkkoaineisto] [viitattu 4.1.2019] Saatavissa: <http://vuoluset.fi/kaiuttimien-historian-paakohdat/>
- [2] National Instruments. LabVIEW 2018 (64-bit) - English. 2019. [latauslinkki] [viitattu 29.11.2018] Saatavissa: <http://www.ni.com/download/LabView-development-system-2018/7413/en/>
- [3] Travis, J & Kring, J. LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun. 3<sup>rd</sup> ed. USA: Prentice Hall. 2006. p.27-31. ISBN-10: 0-13-185672-3
- [4] National Instruments. NI-VISA 18.0. 2019. [latauslinkki] [viitattu 11.12.2018] Saatavissa: <http://www.ni.com/download/ni-visa-18.0/7597/en/>
- [5] National Instruments. Agilent Technologies / Keysight Technologies E3646A. 2014. [latauslinkki] [viitattu 29.11.2018] Saatavissa: [http://sine.ni.com/apps/utf8/niid\\_web\\_display.model\\_page?p\\_model\\_id=423](http://sine.ni.com/apps/utf8/niid_web_display.model_page?p_model_id=423)
- [6] National Instruments. Agilent Technologies / Keysight Technologies 53131A. 2014. [latauslinkki] [viitattu 4.12.2018] Saatavissa: [http://sine.ni.com/apps/utf8/niid\\_web\\_display.model\\_page?p\\_model\\_id=1003](http://sine.ni.com/apps/utf8/niid_web_display.model_page?p_model_id=1003)
- [7] National Instruments. Agilent Technologies / Keysight Technologies 33120A. 2014. [latauslinkki] [viitattu 4.12.2018] Saatavissa: [http://sine.ni.com/apps/utf8/niid\\_web\\_display.model\\_page?p\\_model\\_id=103](http://sine.ni.com/apps/utf8/niid_web_display.model_page?p_model_id=103)
- [8] National Instruments. NI-DAQmx. 2019. [latauslinkki] [viitattu 14.12.2018] Saatavissa: <http://www.ni.com/fi-fi/support/downloads/drivers/download.ni-daqmx.html#291872>
- [9] ZEBRA. 110XIIIPLUS INDUSTRIAL PRINTER SUPPORT. 2019. [latauslinkki] [viitattu 13.12.2018] Saatavissa: <https://www.zebra.com/us/en/support-downloads/printers/industrial/110xiii-plus.html>
- [10] National Instruments. NI LabVIEW 2018 Database Connectivity Toolkit. 2019. [latauslinkki] [viitattu 17.12.2018] Saatavissa: <http://www.ni.com/download/labview-database-connectivity-toolkit-2018/7387/en/>
- [11] Agilent Technologies. User's Guide Agilent E364xA Dual Output DC Power Supplies. 2000. p. 34. PDF saatavissa: <https://www.yumpu.com/en/document/read/27290130/agilent-e3646a-service-manual-with-schematics-gerry-sweeney>
- [12] Altium Ltd. What is a printed circuit board? Make circuits by connecting components. 2019. [verkkoaineisto] [viitattu 15.1.2019] Saatavissa: <https://www.altium.com/solution/what-is-a-pcb>
- [13] Sattel, S. The history of PCBs. 2016. [blogi] [viitattu 20.1.2019] Saatavissa: <https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/history-of-pcbs/>

- [14] Brown, J. The history of printed circuit boards – Infographic. 3.1.2013. [verkkoartikkeli] [viitattu 20.1.2019] Saatavissa: <https://www.pcb-solutions.com/pcb-market-monitor/the-history-of-pcb-infographic/>
- [15] Printed Circuit Design & Fab. A short history of electronic data formats. 28.6.2011. [verkkoartikkeli] [viitattu 20.1.2019] Saatavissa: <https://pcdandf.com/pcdesign/index.php/menu-research/pcb-design-history/6917-a-short-history-of-electronic-data-formats>
- [16] Altium Designer. Explain like I'm a Designer: ELIC PCB and HDI multilayer designing. 17.5.2018 [blogi] [viitattu 22.1.2019] Saatavissa: <https://resources.altium.com/pcb-design-blog/explain-like-i-m-a-designer-elic-pcb-and-hdi-multilayer-designing>
- [17] Pcbcart. Printed circuit board assembly (PCBA) process. 2019. [verkkoartikkeli] [viitattu 1.2.2019] Saatavissa: <https://www.pcbcart.com/article/content/pcb-assembly-process.html>
- [18] Gong, L. Differences between SMT and through-hole technology. 16.1.2018. [blogi] [viitattu 5.2.2019] Saatavissa: <https://www.seeedstudio.com/blog/2018/01/16/differences-between-through-hole-and-smt/>
- [19] Royal Circuit Solution. Why do we need DFM check for PCBs. 2019. [verkkoaineisto] [viitattu 5.2.2019] Saatavissa: <https://www.royalcircuits.com/tools/why-you-need-dfm-check-pcb/>
- [20] Acceleratedassemblies. In-circuit testing: the best technique to detect manufacturing faults. 8.1.2018. [blogi] [viitattu 6.2.2019] <http://www.acceleratedassemblies.com/blog/in-circuit-testing-the-best-technique-to-detect-manufacturing-faults/>
- [21] Electronicnotes. Flying probe in-circuit testing. [verkkoartikkeli] [viitattu 6.2.2019] Saatavissa: <https://www.electronics-notes.com/articles/test-methods/automatic-automated-test-ate/ict-in-circuit-test-flying-probe.php>
- [22] Pcbcart. Why is X-ray inspection technology so important in PCB assembly? 2019. [verkkoartikkeli] [viitattu 6.2.2019] Saatavissa: <https://www.pcbcart.com/article/content/Xray-inspection-in-PCB-assembly.html>
- [23] Bittele. Functional testing. 2019. [verkkoaineisto] [viitattu 8.2.2019] Saatavissa: <https://www.7pcb.com/Functional-Testing.php>
- [24] Cort, A. Functional testing of PCBs. 1.7.2002. [verkkoartikkeli] [viitattu 8.2.2019] Saatavissa: <https://www.assemblymag.com/articles/83988-functional-testing-of-pcb>
- [25] Valdez, J. & Becker, J. Understanding the I2C bus. 6.2015. PDF saatavissa: <http://www.ti.com/lit/an/slva704/slva704.pdf>



- [26] Philips semiconductors. I2S bus specification. 5.6.1996 PDF saatavissa: [https://web.archive.org/web/20070102004400/http://www.nxp.com/acrobat\\_download/variouse/I2SBUS.pdf](https://web.archive.org/web/20070102004400/http://www.nxp.com/acrobat_download/variouse/I2SBUS.pdf)
- [27] Circuit basics. Basics of UART communication. 2016. [verkkoaineisto] [viitattu 10.2.2019]. Saatavissa: <http://www.circuitbasics.com/basics-uart-communication/>
- [28] AsahiKASEI. AK4688 Asynchronous stereo CODEC with capless I/O. 5.2012. PDF saatavissa: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/552466/AKM/AK4688EN.html>